

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Теплоенергетичний факультет

Кафедра теоретичної і промислової теплотехніки

«На правах рукопису»
УДК 621.43.056:632.15

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Геннадій ВАРЛАМОВ
(підпис) (ім'я, прізвище)

“ _____ ” _____ 2021 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 144 «Теплоенергетика»

на тему: Підвищення ККД кожухопластинчастих теплообмінників та зниження їх гідравлічного опору за допомогою поверхнево-активних речовин

Виконав : студент II курсу, групи ТП – 91 мн

Олійник Богдан Валерійович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц. к.т.н. Петро БАРАБАШ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище) (підпис)

Консультант з мат. моделювання к.т.н. Андрій СОЛОМАХА
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, ім'я, прізвище) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України

**«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет Теплоенергетичний

Кафедра Теоретичної і промислової теплотехніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність 144 «Теплоенергетика».

ОНП «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Геннадій ВАРЛАМОВ
(підпис) (ім'я, прізвище)

«___» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Олійнику Богдану Валерійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Підвищення ККД кожухопластинчастих теплообмінників та зниження їх гідравлічного опору за допомогою поверхнево-активних речовин
науковий керівник дисертації доц. к.т.н. Барабаш Петро Олексійович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «15» березня 2021 р. № 815-с

2. Термін подання студентом дисертації 14.05.2021 р.

3. Об'єкт дослідження: Кожухопластинчасті теплообмінні апарати

4. Предмет дослідження: кондиціонування внутрішніх поверхонь теплообмінників щільними мономолекулярними шарами ПАР у діапазоні швидкостей теплоносія від 0,5 до 2,5 м/с.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Загальні дані про кожухопластинчасті теплообмінники типу PSHE

5.2. Особливості пластин та гофрування кожухопластинчастих теплообмінників _____

5.3. Стан питання зниження ефективності в наслідок накипоутворення і корозії.

5.4. Моделювання та аналіз теплових процесів після використання ПАР.

5.5. Порівняння коефіцієнтів теплопередачі до та після застосування ПАР та висновки.

5.6. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Спрощена модель пакета пластин, розроблена в Solidworks. Плакат «Принцип роботи кожухопластинчастих ТОА». Презентація 20 слайдів _____

7. Орієнтовний перелік публікацій: тези 19 міжнародної конференції молодих вчених, аспірантів, магістрантів ,студентів

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
мат. моделювання	Андрій СОЛОМАХА, доцент		

9. Дата видачі завдання 25.03.21

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Загальні дані про кожухопластинчасті теплообмінники типу PSHE	26.03.21 р.	
2	Особливості пластин та гофрування кожухопластинчастих теплообмінників	30.03.21 р.	
3	Стан питання зниження ефективності в наслідок накипоутворення і корозії.	15.04.21 р.	
4	Моделювання та аналіз теплових процесів після ПАР.	20.04.21 р.	
5	Порівняння коефіцієнтів теплопередачі до та після застосування ПАР та висновки.	24.04.21 р.	
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.	28.04.21 р.	
7	Оформлення дисертації	01.05.21 р.	
8	Нормоконтроль дисертації	03.05.21 р.	
9	Здача матеріалів дисертації на кафедру	14.05.21 р.	
19	Захист дисертації	20.05.21 р.	

Студент

(підпис)

Богдан ОЛІЙНИК
(ім'я, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Петро БАРАБАШ
(ім'я, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на здобуття ступеня магістра за освітньо-науковою програмою підготовки на тему «Теплообмін в кожухопластинчастих апаратах при використанні сучасних поверхнево-активних речовин»: 99 с., 29 рис., 24 табл., 4 додатка, 71 джерело.

Об'єкт дослідження – Кожухопластинчасті теплообмінні апарати

Мета роботи – зниження гідравлічного опору трубопроводів на 25-30% і підвищення внутрішнього ККД кожухопластинчастих теплообмінників до 4% за рахунок кондиціонування внутрішніх поверхонь теплообмінників та трубопроводів щільними мономолекулярними шарами ПАР у діапазоні швидкостей теплоносія від 0,5 до 2,5 м/с.

Проаналізовані основні способи очищення теплообмінних поверхонь кожухопластинчастих теплообмінників та вибраний найефективніший – модифікація теплоносія триетаноламіновим ефіром жирних кислот.

Розглянуті особливості пластин та гофрування кожухопластинчастих теплообмінників, механізм руйнування відкладень на теплообмінних поверхнях у присутності адсорбційного середовища. Наведені методики розрахунку гідравлічного опору та теплопередачі в каналах кожухопластинчастих теплообмінних апаратів. Зроблено моделювання процесу теплообміну на поверхні нагріву до і після застосування поверхнево активних речовин.

Зроблена оцінка впливу модифікованого теплоносія на теплообмін і гідродинаміку пластин теплообмінника. Розглянуті екологічні аспекти модифікації теплоносія триетаноламінованиим ефіром.

На базі програмного забезпечення Solid Works побудовано дві геометричні моделі пакета пластин кожухопластинчастого теплообмінника з грубодисперсними відкладеннями і без них. Отримані значення теплового потоку, що надходить від теплоносія та коефіцієнти теплопередачі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: теплообмінник, пластина, теплообмін, поверхнево активні речовини, накип, корозія, тепловий потік, температура, енергетична та екологічна ефективність

ABSTRACT

Master's dissertation for a master's degree in the educational-scientific training program on "Heat transfer in shell-and-plate apparatus using modern surfactants": 99 pp., 29 figures, 24 tables, 4 appendices, 71 sources.

The object of research - Shell-plate heat exchangers

The purpose of the work is to reduce the hydraulic resistance of pipelines by 25-30% and increase the internal efficiency of shell-and-plate heat exchangers to 4% by conditioning the inner surfaces of heat exchangers and pipelines with dense monomolecular layers of surfactants in the range of coolant speeds from 0.5 to 2.5 m /with.

The main methods of cleaning the heat exchange surfaces of shell-and-plate heat exchangers are analyzed and the most effective one is selected - modification of the heat carrier by triethanol-mine ester of fatty acids.

Features of plates and corrugation of shell-and-plate heat exchangers, the mechanism of destruction of deposits on heat-exchange surfaces in the presence of the adsorption environment are considered. Methods of calculation of hydraulic resistance and heat transfer in the channels of shell-and-plate heat exchangers are given. The simulation of the heat exchange process on the heating surface before and after the application of surfactants is made.

The estimation of influence of the modified heat carrier on heat exchange and hydrodynamics is made. The ecological aspects of modification of the heat carrier by triethanolamine ether are resulted.

On the basis of the Solid Works software two geometrical models of a package of plates of the shell-plate heat exchanger with coarsely dispersed deposits and without them results of a heat stream arriving from the heat carrier and heat transfer coefficients are constructed.

KEY WORDS: heat exchanger, plate, heat exchange, surfactants, scale, corrosion, heat flow, temperature, energy and environmental efficiency

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на соискание степени магистра по образовательно-научной программе подготовки на тему «Теплообмен в кожухопластинчатых аппаратах при использовании современных поверхностно-активных веществ»: 99с., 29 рис., 24 табл., 4 приложения, 71 источников.

Объект исследования - Кожухопластинчатые теплообменные аппараты. Цель работы - снижение гидравлического сопротивления трубопроводов на 25-30% и повышение внутреннего КПД кожухопластинчатых теплообменников до 4% за счет кондиционирования внутренних поверхностей теплообменников и трубопроводов плотными мономолекулярными слоями ПАВР в диапазоне скоростей теплоносителя от 0,5 до 2,5 м / с.

Проанализированы основные способы очистки теплообменных поверхностей кожухопластинчатых теплообменников и выбран самый эффективный - модификация теплоносителя триетаноламеновым эфиром жирных кислот.

Рассмотрены особенности пластин и гофрирования кожухопластинчатых теплообменников, механизм разрушения отложений на теплообменных поверхностях в присутствии адсорбционной среды. Приведены методики расчета гидравлического сопротивления и теплопередачи в каналах кожухопластинчатых теплообменных аппаратов. Сделано моделирование процесса теплообмена этажа нагрева до и после применения поверхностно-активных веществ.

Произведена оценка влияния модифицированного теплоносителя на теплообмен и гидродинамику. наведены экологические аспекты модификации теплоносителя триетаноламинированием эфиром

На базе программного обеспечения Solid Works построены две геометрические модели пакета пластин кожухопластинчатого теплообменника с грубодисперсными отложениями и без них полученные результаты теплового потока, поступающего от теплоносителя и коэффициенты теплопередачи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплообменник, пластина, теплообмен, поверхностно активные вещества, накипь, коррозия, тепловой поток, температура, энергетическая и экологическая эффективность

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, скорочень, термінів.....	8
Вступ.....	10
1 Загальні дані про кожухопластинчасті теплообмінні апарати.....	11
1.1 Опис зварного розбірного кожухопластинчастого теплообмінного апарату.....	12
1.2 Конструкція теплообмінника.....	15
1.3 Рух потоків в кожухопластинчастих теплообмінних апаратах.....	17
1.4 Питання ефективності застосування та визначення енергетичних показників.....	19
1.5 Висновки до розділу 1.....	22
2 Особливості пластин та гофрування теплообмінників.....	23
2.1 Методика розрахунку кожухопластинчастих теплообмінників.....	28
2.2 Гідравлічний опір в каналах кожухопластинчастих теплообмінних апаратах.....	30
2.3 Теплопередача в каналах кожухопластинчастих теплообмінних апаратах.....	33
2.4 Висновки до розділу 2.....	36
3 Стан питання зниження ефективності теплообмінного обладнання в наслідок накипоутворення та корозії.....	37
3.1 Вплив відкладень на теплообмін в кожухопластинчастих теплообмінних апаратах.....	40
3.2 Застосування поверхнево активних речовин в теплоенергетиці.....	44
3.3 Вплив поверхнево активних речовин на теплообмін та гідрогазодинаміку.....	47
3.4 Висновки до розділу 3.....	54
4 Теплоенергетичні процеси у модифікованому триетаноламінованим ефіром жирних кислот теплоносії.....	55
4.1 Моделювання процесу теплообміну на поверхні нагріву.....	55
4.2 Механізм руйнування відкладень на теплообмінних поверхнях у присутності адсорбційного середовища.....	59
4.3 Утворення гідрофобної плівки на твердій поверхні.....	64
4.4 Висновки до розділу 4.....	67
5 Побудова моделі та проведення досліджень.....	68
5.1 Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі.....	69
5.2 Оцінка впливу модифікованого теплоносія на теплообмін гідродинаміку.....	71
5.3 Висновки до розділу 5.....	75
6 Практична реалізація результатів роботи. Техніко економічна оцінка.....	77

6.1 Розрахунок річних експлуатаційних витрат на обробку живильної води та економічної ефективності застосування результатів досліджень.....	79
6.2 Екологічні аспекти модифікованого теплоносія.....	81
6.3 Висновки до розділу 6.....	84
Висновки.....	85
Список використаної літератури.....	86
Додатки	
Додаток А	
Технічне завдання на науково-дослідницьку роботу.....	92
Додаток Б	
Акт впровадження результатів агістерської дисертації.....	93
Додаток В	
Список наукових праць і творчих досягнень.....	94
Додаток Г	
Перевірка магістерської дисертації на академічний плагіат.....	99

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

Умовні позначення

Q – тепловий потік, кількість теплоти;

k – коефіцієнт теплопередачі;

F – площа поверхні;

Δt – температурний перепад;

t – температура;

L – довжина;

V – об'єм;

G – витрата;

m – кратність повітрообміну;

ρ – густина;

c – теплоємність;

ω – швидкість;

f – площа поперечного перерізу каналу;

d – діаметр трубопроводу.

Індекси Нижні:

о – опалення;

макс – максимальний;

сер – середній;

вн – внутрішній;

р – розрахункова;

річн – річна;

п – повітря;

гв – гаряча вода;

хв – холодна вода;

зовн – зовнішній;

сист – система;

вит – витікання;

м.п – мережевий підігрівник;

в.к – водогрійний котел;

пер – перепуск;

рец – рециркуляція;

зав – завантаження;

м – мережа;

мн – мережний насос;

в – вода;

тр – трубопроводи.

Верхні:

л – літній період;

мах – максимальний;

в.п – власні потреби;

гв – гаряча вода;

ном – номінальна;

д – дійсна;

Скорочення

ГВП – гаряче водопостачання;

ТОА – теплообмінний апарат;

ХВО – хімічна водо підготовка;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ПТА – пластинчастий теплообмінний апарат;

КПТА – кожухопластинчастий теплообмінний апарат;

ПАВ – поверхнево активні речовини

ВСТУП

В Україні гостро стоїть проблема надійності і енергоефективності систем теплопостачання та теплотехнічного обладнання. У середньому зношеність теплообмінного обладнання у комунальному секторі складає 80-85%. У 97% випадків причиною пошкоджень теплових мереж є руйнування металу трубопроводів через розвинуті корозійні процеси. До 30% всіх пошкоджень пов'язано з внутрішньою корозією локального характеру, що протікає під шаром накипних відкладень. Корозія та відкладення є причиною погіршення теплообміну, перевитрати палива теплогенеруючим обладнанням, зниження потужності; підвищення гідравлічного опору прохідних каналів і збільшення витрат електроенергії на транспортування теплоносія; пониження надійності роботи обладнання, скорочення терміну його експлуатації; погіршення екологічних характеристик.

Найпоширенішими для боротьби з утворенням накипними відкладеннями в теплотехнічному обладнанні є методи реагентного та іонообмінного пом'якшення. Для зниження швидкості корозії використовують методи зміни іонного складу води, окисно-відновного потенціалу теплоносія або пасивація металу. Попри функціонування водопідготовчих установок на котельнях комунальні підприємства змушені регулярно проводити очищення теплообмінних поверхонь із застосуванням складних фізичних та хімічних методів та виводом обладнання з експлуатації.

Для комплексної технології ведення водно-хімічного режиму систем теплопостачання доцільним є модифікування теплоносія плівко утворюючими поверхнево-активними речовинами. Сформований на поверхні металу обладнання шар-плівка з молекул модифікатора є бар'єром по відношенню до зовнішніх впливів. Це дозволяє покращити теплообмін, підвищити надійність обладнання, продовжити термін його експлуатації та зменшити експлуатаційні витрати.

1 ЗАГАЛЬНІ ДАНІ ПРО КОЖУХОПЛАСТИНЧАСТІ ТЕПЛООБМІННИКИ

Протягом останніх двох десятирічь великого попиту набули кожухопластинчасті теплообмінники. Це пов'язано з тим, що цей вид теплообмінників має ряд переваг порівняно з кожухотрубними і пластинчастими аналогами. Переваги застосування кожухопластинчастих теплообмінників добре відомі. Вони більш ефективні, займають менше простору, мають меншу масу, при цьому не потребують частого чищення, як це відбувається з кожухотрубними теплообмінниками. Коли матеріал апарату є традиційним або «екзотичними» (висока вартість), ціна пластинчастого теплообмінника буде також нижче вартості традиційного кожухотрубного теплообмінника внаслідок меншої площі теплообміну. Отже, будуть економно витратитися кошти в разі застосування корозійних рідин.

Слід враховувати, що в традиційних теплообмінниках зварні пластини прямокутної форми (конструкція чотирьох зварних кутових з'єднань) мають незадовільну характеристику внаслідок низького опору до втоми, викликаній високою температурою і тиском, і не ідеальні для застосування. Кутове зварювання дуже часто призводить до появи тріщин, що в результаті вимагає зупинки установки і незапланованого ремонту.

Отже, ця конструкція може бути замінена більш надійними кожухопластинчастими теплообмінниками для підвищення надійності і довговічності. Сучасний кожухопластинчастий теплообмінник являє собою рішення, яке поєднує конструкцію традиційного кожухотрубного теплообмінника і деякі деталі з обмеженнями кутового з'єднання пластин. Таке поєднання конструкції забезпечує термічну ефективність і компактність теплообмінника з каркасно-пластинчастою системою. Хоча можливість керування тиском і температурою теплоносіїв вимагає, навпаки, застосування кожухотрубного теплообмінника.

Завдяки хорошому опору до температурної втоми і втоми до тиску кожухопластинчасті теплообмінники виграють конкуренцію в порівнянні з іншими (зварними) апаратами. Випробування також довели можливість роботи кожухопластинчастих при різних рідинах, газах, парі і двофазних сумішах. Компактна конструкція дає можливість легкого доступу до обладнання, забезпечує швидкі запуск і зупинку при змінах процесу. З термічної точки зору кожухопластинчатого теплообмінника дуже добре пристосована для суміші пара / рідина.

Короткий шлях потоку і великий поперечний переріз роблять такий теплообмінник придатним для міжфазного потоку з високим LMTD (logarithmic mean temperature difference

- середня логарифмічна різниця температур) між гарячою і холодною стінками теплообмінника.

1.1 Опис зварного розбірного кожухопластинчастого теплообмінника

Все різноманіття конструкцій теплообмінних апаратів може бути розділене на декілька груп за певними ознаками. За схемою руху циркулюючих середовищ теплообмінні апарати можуть бути регенеративними і рекуперативними. У порівнянні з ними в рекуперативних апаратах відбувається постійний спільний рух робочого та охолоджуючого середовищ, розділених поверхнею теплообміну. Даний процес позбавлений недоліків і тому отримав найбільш широке розповсюдження. За напрямком руху середовищ рекуперативні апарати діляться на супутні (прямоточні), протиточні, перехресні та комбіновані.

Згідно з іншою схемою класифікації, за схемою руху циркулюючих середовищ теплообмінники поділяються на апарати змішування і поверхневі.

За родом охолоджуючої речовини теплообмінники можна розділити на апарати з відведенням теплоти в зовнішнє середовище і з утилізацією теплоти. При відведенні теплоти в зовнішнє середовище в якості охолоджуючого агента зазвичай виступає повітря чи вода. При утилізації теплоти в якості охолоджуючого агента може виступати практично будь-яка речовина, наприклад одна з речовин, яка використовується в технологічній схемі та, яка вимагає нагріву.

З усього різноманіття існуючих конструкцій промислових теплообмінників найбільш поширені апарати з відводом теплоти в зовнішнє середовище як більш універсальні і менш вимогливі до конкретних умов технологічного процесу [1]. Існує безліч технічних рішень таких апаратів. Їх класифікація по конструкції наведена в таблиці 1.1.

На сучасному ринку теплотехнічного і теплоенергетичного обладнання з'явилися кожухопластинчасті теплообмінні апарати різних виробників. Одним із представників такого обладнання є теплообмінні системи PSHE droplet separator. Теплообмінник-випарник, що складається із зварених сепаратора і трубної системи, яка відокремлює вологу і віддає її назад на випаровування. Теплообмінник PSHE є яскравим представником кожухопластинчастих апаратів. Теплообмінник може бути зварений, або зі знімним фланцем. Теплообмінник PRHE фактично є представником пластинчасто-кільцевої конструкції. Особливістю цілком звареної конструкції апарата є великий отвір по центру розташування пластин в кожусі. Середовище на стороні кожуха має характерний радіальний рух. Це унікальні пластинчасті теплообмінники, стійкі до високого тиску. Застосовуються в процесах конденсації, або випаровування при роботі з однофазними середовищами.

Незаперечною перевагою таких теплообмінників є простота конструкції і повний доступ до поверхні теплообміну.

Таблиця 1.1 - Класифікація по конструкції теплообмінних апаратів з відводом тепла в зовнішнє середовище

Тип	Підтип 1	Підтип 2
Повітряні	Вільним рухом повітря	
	З примусовим рухом повітря	
Повітряно-водяні	Зрошувальні	
	Випарникові	
Водяні	Кожухотрубні	вертикальні(КТВ)
		горизонтальні(КТГ)
	Елементні	
	Двохтрубні (труба в трубі)	
	Панельні	панельно-занурені
		панельно-пакетні
	Пластинчасті, в тому числі кожухопластинчасті	

Теплообмінник складається з пакету прямокутних касет, які утворюються з двох пластин, зварених по двох протилежних сторонах. Пакет касет поміщається в спеціальну раму, яка складається з чотирьох стійок, закріплених між двома днищами. Касети в пакеті розташовуються з однаковими зазорами, що утворюють другий контур апарату. В теплообміннику здійснюється перехресний рух потоків. У вільному просторі між стійками, касетами і кришками-дверима утворюються розподільні камери. Вони можуть мати розділові перегородки по кожному контуру для оптимізації циркуляції рідин при багатоходовій схемі. Канали кожного контуру відкриті по всій ширині вхідної і вихідної розподільної камери і закриті з боків в поздовжньому напрямку. Оскільки теплообмінні касети повністю доступні, то можуть бути проінспектовані всі зварні шви касет. Теплообмінники зі звареними касетами HEATEX ідеальні для застосування на підприємствах нафтогазового комплексу та хімічної промисловості (рисунок 1.1).

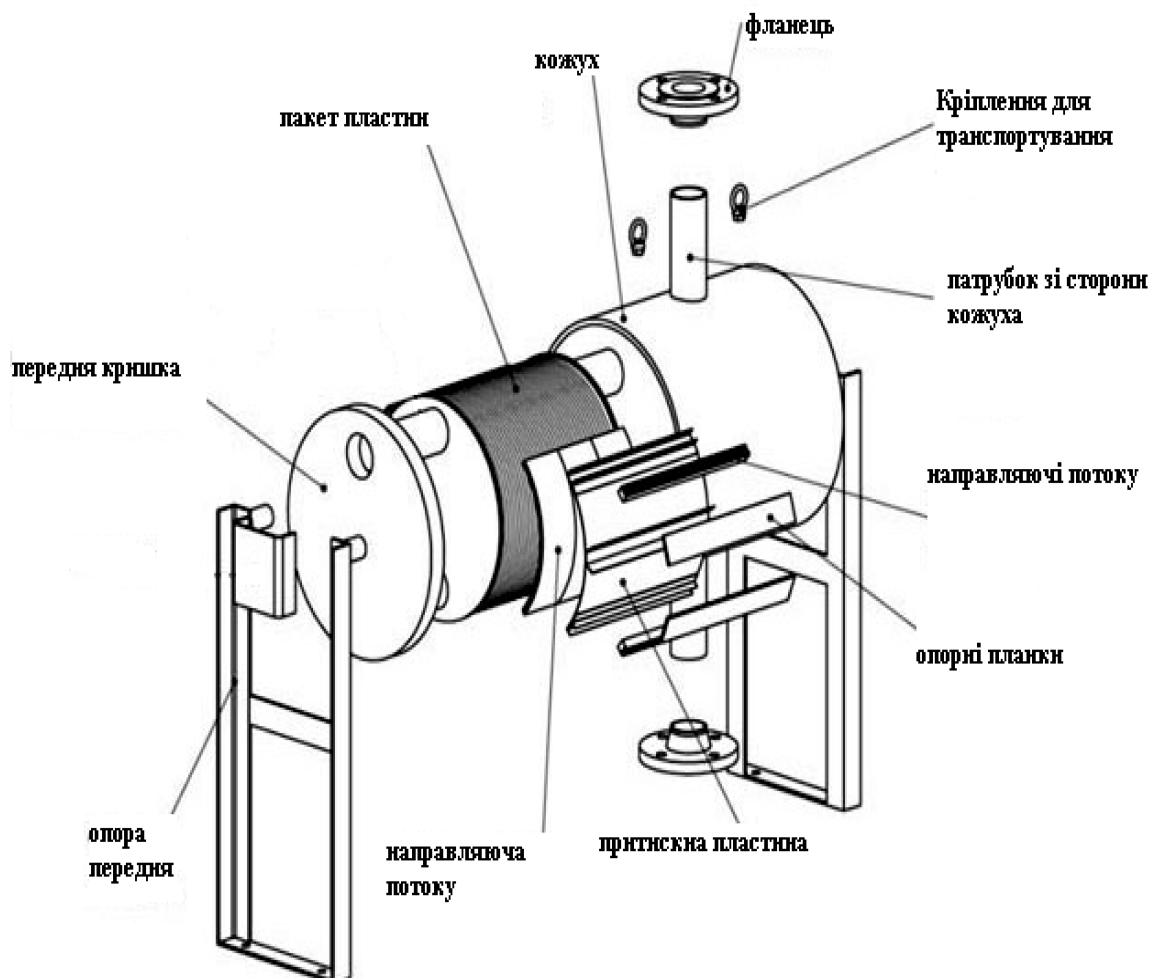


Рисунок 1.1 - Кожухопластинчастий теплообмінник

Ще одна важлива ознака класифікації теплообмінників - це наявність і вид ребер. Оребрення широко використовується в трубчастих теплообмінниках. Причому, оребрення розташовується, як правило, із зовнішнього боку труб. Це обумовлене міркуваннями спрощення виготовлення апаратів.

Порівняльний опис існуючих типів апаратів з активними гідр-газодинамічними режимами руху теплоносіїв показує можливість їх широкого промислового застосування. Однак, для остаточного висновку про оптимальність таких апаратів необхідно провести порівняння з іншими типами існуючих технологічних апаратів таблиця .

Основна перевага кожухопластинчастих теплообмінників полягає в тому, що ці теплообмінники перевершують конструкції з чотирма звареними кутами, так як у них опір до втоми від температури і тиску значно краще, особливо для динамічних процесів, де неминучі чутливі зміни

Відзначимо, що існують спеціальні моделі апаратів із оребренням всередині труб для фреонових холодильних машин. Пластинчасті теплообмінники також використовують оребрені плоскі поверхні як з одностороннім, так і з двостороннім оребренням. Класифікація теплообмінників за типом оребрення наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Класифікація теплообмінників по типу оребрення

Тип	Підтип 1	Підтип 2	Підтип 3	Підтип 4
Гладкі				
Оребрені	Дротові трубні			
	Панельні	Щитові	Односторонні (однолистові)	
			Двосторонні (дволистові)	
		Прокатно-зварні		
	З плоскими ребрами	Литі		
		Накатні		
		Навивні		
		Насадні	Круглі	
			Прямокутні	На одну поверхню
				На всі поверхні

1.2 Конструкція теплообмінника

Зварні кожухопластинчасті теплообмінники (КПТ) є компактними міцними пристроями без ущільнень, об'єднуючи всі вигідні властивості кожухотрубного і пластинчастого теплообмінників. Зварні кожухопластинчасті теплообмінники стійкі до високого тиску (до 140 бар), стійкі до високих температур (до 900 °C), а також мають високий коефіцієнт теплопередачі (рисунок. 1.1).

Серцевина кожухопластинчастого теплообмінника - це цілком зварений пакет пластин, що знаходиться в зовнішньому кожусі. Спочатку пластини по парам зварюють одна з одною в портах, а потім зварюють по периметру в пакет, який згодом вкладається в циліндричний кожух. Одне середовище проникає через приєднувальні патрубки зварного пакета пластин. Пластини є увареними в кришку. З них же виходить інший потік на боці пластин.

Вторинне середовище проникає через приєднувальний патрубок, розміщений на циліндричній поверхні кожуха [2]. Це середовище рухається по каналах між пластинами за допомогою периферійних металевих напрямних, і потім виходить через вихідний патрубок, створюючи потік на стороні кожуха.

Теплопередавальна поверхня кожухопластинчастого теплообмінника складається з штампованих гофрованих пластин. Стінки, зварені між собою по периметру, утворюють два контури каналів складної форми. Канали є герметичними і такими, що поперемінно чергуються (рисунок 1.2). Максимальний рівень теплопередачі досягається шляхом впровадження гофрованих профілів, які природним чином турбулізують рухомі потоки. Рух носіїв може здійснюватися протитоком, прямотоком, або перехресно.

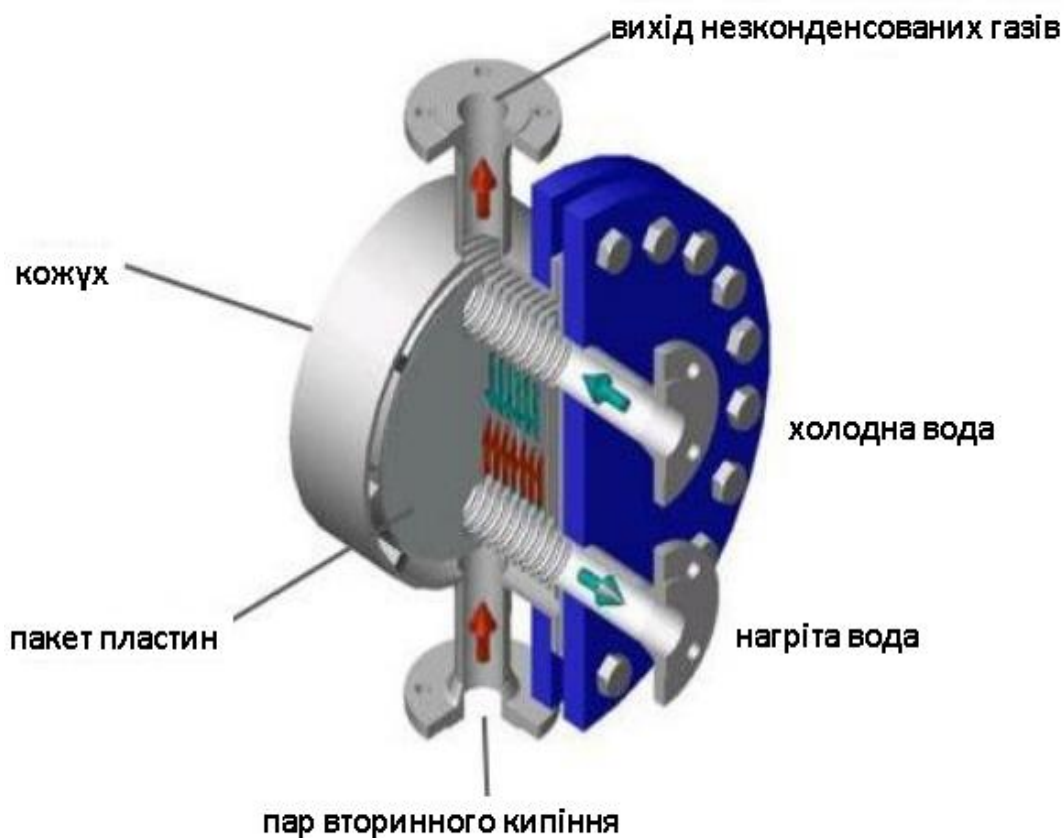


Рисунок 1.2 - Принцип дії кожухопластинчастого теплообмінного апарату

Кожухопластинчасті апарати мають такі переваги:

- Високі граничні експлуатаційні характеристики.
- Широкі проточні канали - для в'язких середовищ і суспензій.
- Ідеальні характеристики для застосування на підприємствах харчової та фармацевтичної промисловості.
- Простота обслуговування і чищення.

- Розділові пластини дозволяють організувати багатоходові схеми теплообміну.
- 4 бічні кришки-двері можуть бути оснащені петлями, що забезпечують більш легкий і швидкий доступ до обох контурів проточних каналів при обслуговуванні теплообмінника.
- Глибина обслуговування каналу – його чистки - досягає 500 мм.
- Оскільки теплообмінні касети повністю доступні, то можуть бути проінспектовані всі зварні шви касет.



а)



б)

в)

Рисунок 1.3 - Приклад кожухопластинчастих теплообмінних апаратів промислового використання для: а) нафтогазової, б) хімічної, в) харчової і фармацевтичної галузей.

1.3 Рух потоків в кожухопластинчастих теплообмінних апаратах

Основною конструкцією кожухопластинчастих апаратів, яку розрізняють в першу чергу, є цілком зварена конструкція. Трохи рідше оперують з конструкцією із кришкою при

одноходовому русі по стороні пластин. Завдяки наявності кришки в таких апаратах можна діставати пакет пластин, оглядати їх і чистити. Також в цьому випадку можна домогтися компактності конструкції - помістити вхідний і вихідний патрубки кожуха на передній кришці.

Рух потоків можна створити за принципом прямотоку, протитоку і перехресного току [3]. Приклад конструкції одно- дво- і багатогодового апарату наведений на рисунку 1.4.

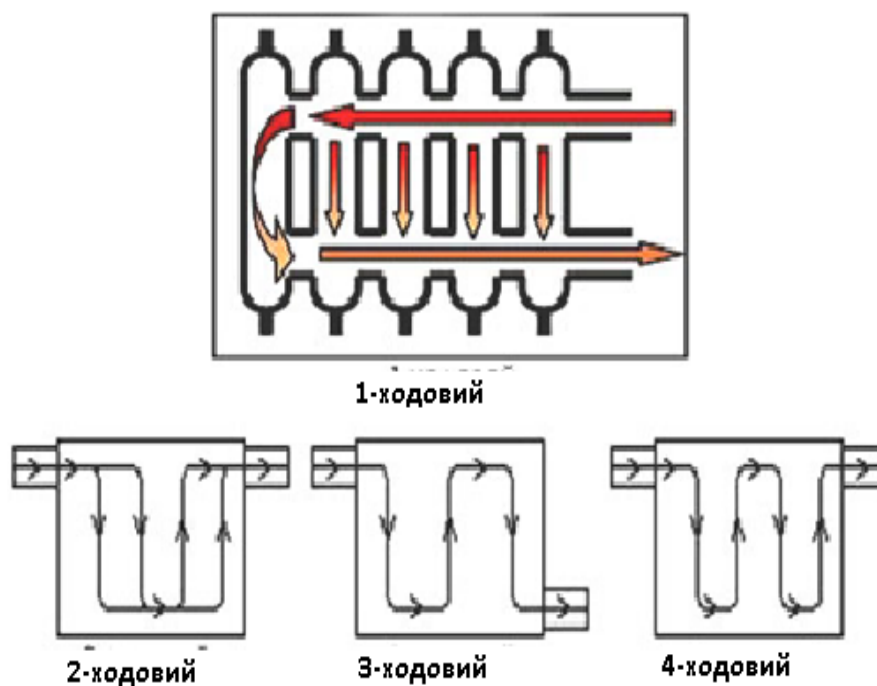


Рисунок 1.4 - Рух потоків в кожухопластинчастих апаратах.

Якщо є необхідність, суцільнозварні теплообмінники можуть бути виконані в багатогодових варіантах не тільки на стороні пластин, а й на стороні кожуха. В останньому випадку ходи утворюються за допомогою спеціальних напрямних і розділових компонентів. Наприклад, такі схеми реалізуються у випадках, якщо необхідно є мала різниця температур між первинним і вторинним теплоносіями.

Площа поверхні теплопередачі може варіюватись залежно від вимог замовника і повністю відповідати вимогам вирішуваних задач. В таких апаратах можуть циркулювати дві в'язкі або навіть "забруднені" рідини.

Для апаратів типу HXS характерною є наявність двох взаємно перпендикулярних прямокутних гладкостінних каналів із привареними розділовими розпірками. Рідина, яка рухається через апарат може бути з великим вмістом механічних домішок.

Основні технічні характеристики вищезгаданих апаратів можна систематизувати, як:

- 1 Компактна конструкція $200 \text{ м}^2 / \text{м}^3$.
- 2 Поверхня теплообміну до 200 м^2 .
- 3 Максимальний тиск 35 бар.
- 4 Максимальна температура 450°C .
- 5 Ширина каналів від 3 до 40 мм.
- 6 Максимальний діаметр патрубків до 300 мм.
- 7 Механічне чищення обох сторін.
- 8 Будь-які зварні шви доступні для огляду.

Такі апарати застосовуються для однофазних середовищ, процесів конденсації або випаровування. Для виробництва теплообмінників такого типу використовується нержавіюча сталь, дуплексний або нікелевий сплав - Hastelloy C 2000 / C22. Виготовлення апаратів відповідає Європейським стандартам - PED E7 / 23 / PЄ.

1.4 Питання ефективності застосування та визначення енергетичних показників теплообмінника

Для оцінки ефективності застосування того чи іншого теплообмінника необхідно розглянути і порівняти вплив режимних параметрів роботи апарату. Шуканими параметрами будуть ті, що входять в загальне рівняння тепловіддачі, тобто включені в числа і критерії подібності такі, як Re, Pr, Gr, Ga тощо. При цьому необхідно враховувати, що деякі параметри являються визначальними, а решта - залежними від них.

Конструкція пластин в теплообмінниках така, що кожна прокладка щільно зафіксована в спеціальному каналі між двома пластинами. Прокладка може бути зафіксована на поверхні пластини двома способами: приклеюванням або фіксацією кліпсами. Приклеєна прокладка добре тримається на поверхні пластини, що дозволяє виконувати регулярну збирання-розбирання теплообмінників, механічне чищення без зняття і регулярної заміни прокладок. Кліпсова фіксація частіше застосовується в харчовій промисловості.

Для апаратів із активними гідро газодинамічними режимами руху теплоносіїв швидкість руху, в свою чергу, визначає і температуру робочої речовини t_n . Ця температура визначає основні теплофізичні параметри, зокрема теплоємність c_p , коефіцієнт динамічної в'язкості μ і коефіцієнт теплопровідності λ ; вхідну температуру охолоджуючої речовини (холодоносія) $t_{в1}$, витрату і режим подачі вторинного теплоносія. Разом з t_n ці величини визначають температурне поле, що виникає в апараті, в т.ч. температуру стінки t_{cm} , температуру границі розподілу фаз $t_{зр}$. В решті решт, весь комплекс розглянутих величин

впливатиме на значення середнього коефіцієнта теплопередачі в різних теплотехнічних апаратах-теплообмінниках [4].

В таблиці 1.4 представлені дані по середньому значенню коефіцієнта теплопередачі в різних теплотехнічних апаратах.

Таблиця 1.4 - Значення середнього коефіцієнта теплопередачі в різних теплотехнічних апаратах

Процес теплопередачі	k, Вт/(м²·К)
Від газу до газу (пластинчасті ТОА із вільним рухом середовищ)	10-25
Від газу до газу (будь-які ТОА з примусовим рухом середовищ)	20-50
Від газу до води (панельний повітряний теплообмінник)	60
Від газу до води (любі ТОА із примусовим рухом газу)	50-100
Від води до води (теплообмінники із рухом води по трубкам)	500 - 700
Від води до води (пластинчастий теплообмінник)	1000-1200
Від водяної пари, яка конденсується, до масел (горизонтальний кожухотрубний конденсатор)	~ 350
Від водяної пари, яка конденсується, до води (горизонтальний кожухотрубний конденсатор)	2900 - 3000
Від аміаку, який конденсується, до води (горизонтальний кожухотрубний конденсатор типу КТГ)	700-1000
Від аміаку, який конденсується, до води (вертикальний кожухотрубний конденсатор типу КТВ)	~ 1000
Від фреону, який конденсується, до води (горизонтальний кожухотрубний конденсатор)	- 700
Від фреону, який конденсується, до води (горизонтальний кожухотрубний зрошувальний конденсатор)	700-930
Від аміаку чи фреону, який конденсується, до повітря (повітряний конденсатор)	-30
Від аміаку, що випаровується, до холодоносія (кожухотрубний випарник типу ВКТ)	-3500
Від аміаку, що випаровується, до холодоносія (панельний випарник типу ВП)	2300-3500
Від фреону, що випаровується, до холодоносія (кожухотрубний випарник із гладкими сталевими трубами)	2300-4650
Від фреону, що випаровується, до холодоносія (кожухотрубний випарник із мідними трубами накатаного оребрення)	4650-6400
Від фреону, що випаровується, до холодоносія (внутрішньо трубний випарник типу ВТВР)	2300-11000

Примітка. Всі випарники розглядаються тільки горизонтальні. Дані по теплопередачі для фреонових апаратів відносяться до фреону-22 (R22); для фреону-12 (R12) відповідні

значення на 10% є нижчими. Під холодоносієм розуміється технічний водний розчин солей NaCl, MgCl₂ або CaCl₂ різної концентрації.

Таким чином, із конструктивних критеріїв, що впливають на ефективність теплопередачі, можна виділити:

- організацію вимушеного руху середовищ, що особливо ефективно проявляється у випадку теплообміну з газом (повітрям);
- оребрення поверхні;
- застосування пластинчастих апаратів в порівнянні з іншими типами;
- застосування кожухотрубних і вертикальних апаратів в порівнянні з іншими типами.

Загальний вигляд рівнянь тепло- і масопереносу збігається, але для опису масовіддачі використовуються дифузійні критерії і числа подібності. Прийнято спрощувати критеріальні рівняння для можливості їх легкого використання в інженерних розрахунках. У такому випадку вплив поля зовнішніх масових сил позначається побічно, через зміну характерної швидкості потоку в числі Re.

З іншого боку, багато дослідників дотримуються принципу найбільш точного наукового опису досліджуваного процесу. Зазвичай це приводить до необхідності введення в критеріальне рівняння додаткових множників, які дозволяють точніше врахувати характеристики досліджуваного процесу. Тоді форма запису критеріального рівняння процесу конденсації в узагальненому вигляді може бути наступною:

$$Nu = C Re^n Pr^m Gr^j Ga^k Ki \cdot (g/g'')^x (\mu''/\mu')^y (L/d_{вн})^z. \quad (1.1)$$

Результати більшості дослідників тепло масообміну виражаються саме в критеріальній формі в силу наукової традиції. Однак використання тільки критеріальних залежностей створює ряд труднощів. Основними із них є:

- для визначення конкретного виду критеріальних рівнянь необхідно проведення експериментального дослідження;
- рамки застосування критеріальних залежностей обмежені умовами експерименту, в якому вони встановлені, тому критеріальні рівняння не дозволяють прораховувати параметри довільних процесів;
- присутність в критеріальних співвідношеннях величин, значення яких при розрахунку заздалегідь невідомі і які, в свою чергу, залежать від параметрів процесу, дозволяє вести обчислення тільки методом ітерацій.

1.5 Висновки до розділу 1

1 Основна перевага кожухопластинчастих теплообмінників полягає в тому, що ці теплообмінники перевершують конструкції з чотирма звареними кутами, так як у них опір до втрати від температури і тиску значно краще, особливо для динамічних процесів, де неминучі чутливі зміни.

2 Порівнявши і дослідивши різні типи теплообмінників, отримано докази того, що найбільш оптимальним та ефективним варіантом буде кожухопластинчастий теплообмінник.

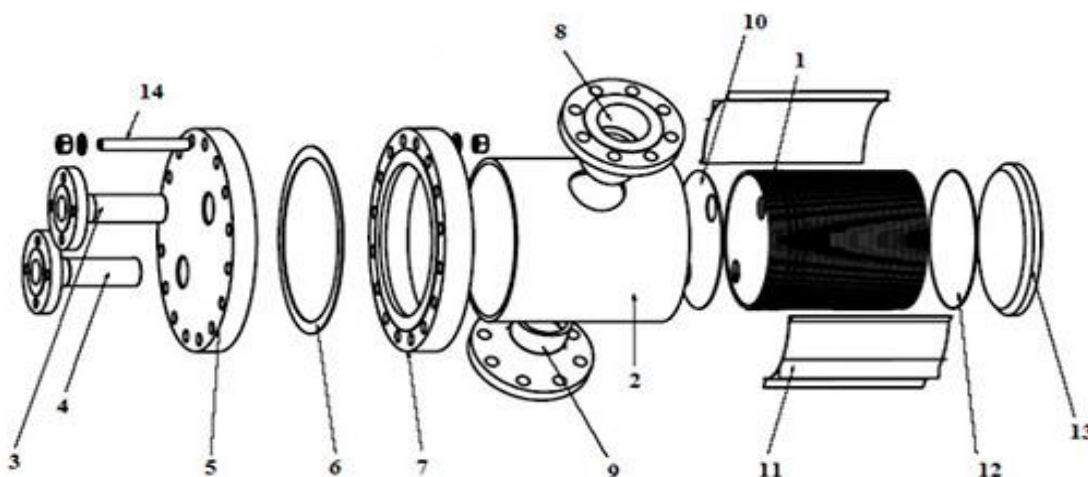
3 Процеси стиснення газу - це можливість використовувати переваги всіх зварних кожухопластинчастих теплообмінників.

4 Але не в усіх випадках дотепер застосовуються такі апарати. Адже бувають різні фізичні умови і кожному покупцю потрібний теплообмінник з конкретними технічними характеристиками. Споживачів можливо не привабить загальна картина ефективності кожухопластинчастих теплообмінників.

5 Якщо теплообмінник підібраний найбільш оптимальним чином, то площа теплообміну буде меншою, ніж у подібних аналогів через те що коефіцієнт теплопередачі його більший. Помилково вважати велику площу перевагою, не розуміючи, що велика площа - значить менший коефіцієнт теплопередачі, менша турбулізація потоку, більший занос поверхні забрудненнями, більше проблем з експлуатацією в майбутньому.

2 ОСОБЛИВОСТІ ПЛАСТИН ТА ГОФРУВАННЯ ТЕПЛООБМІННИКІВ

Базовою і найбільш поширеною конструкцією кожухопластинчастого теплообмінного апарату (КПТА) є розбірний, представлений на рисунку 2.1.



1 - пакет пластин; 2 - кожух; 3 - вхід зі сторони пластин; 4 - вихід зі сторони пластин;
5 - фланцева заглушка; 6 - ущільнення; 7 - фланець кожуха; 8 - вхід зі сторони кожуха;
9 - вихід зі сторони кожуха; 10 - з'єднувальний диск; 11 - напрямок потоку; 12 - кінцевий диск; 13 - кінцева пластина; 14 – болт.

Рисунок 2.1 - Кожухопластинчастий теплообмінник.

Він складається з тонких гофрованих пластин з корозійностійких сплавів, виготовлених шляхом штампування, які утворюють два канали по яких рухаються теплоносії (гарячий та холодний), що забезпечують процес теплопередачі між потоками. Пакет пластин розміщений у кожусі теплообмінника. Всі пластини мають ущільнюючі прокладки, які забезпечують герметичність каналів для проходження робочих рідин.

Система прокладок обумовлює проходження теплоносія по відповідним каналам, завдяки чому весь час забезпечується герметичність контурів по холодній та гарячій стороні, як правило в режимі протитечії. Конструкція та конфігурація ущільнюючих прокладок виключають можливість змішування цих рідин навіть при виникненні витоків, які можуть статися тільки назовні [5].

Теплообмінні пластини з обох сторін мають гофровану поверхню, що забезпечує високу ступінь турбулентності потоку кожної рідини по каналам і жорсткість конструкції теплообмінника. Поєднання високої турбулентності потоку рідини з відповідним співвідношенням обсягу середовища каналів і розміру теплообмінника дозволяє отримати високий коефіцієнт теплопередачі.

Форма пластин і профілі їх поверхні дуже різноманітні (рисунк 2.2). Пластини випускаються з площею поверхні теплопередачі від 0,025 до 3,5 м², що дозволяє реалізовувати максимально точний вибір апаратів на необхідне теплове навантаження при заданих обмеженнях по робочим середовищам.

Мала товщина пластин (0,4–1,0 мм) і невеликий зазор між пластинами (3–6 мм) дозволяє отримати високу компактність і низьку металоємність. Питома робоча поверхня сучасних апаратів може досягати 1500 м²/м³.

Ще одним важливим елементом конструкції є тип і матеріал ущільнення. В якості ущільнень використовуються, як правило стандартні матеріали, такі як:

1 NBR - нітрил-каучук - універсальне ущільнення для водних і жирних середовищ типу вода / масло. Не застосовується для пари. Діапазон робочих температур від -20 до + 140 °С.

2 EPDM - етилен-пропілен-каучук - широка область застосування, для хімічних сполук, що не містять жир і мінеральні масла. Діапазон робочих температур від -30 до + 160 °С.

3 VITON - фтор-каучук - висока стійкість до хімікалій, органічним розчинювальним речовинам, а також сірчаної кислоти і маслам при високих температурах. Діапазон робочих температур від -10 до + 190 °С.

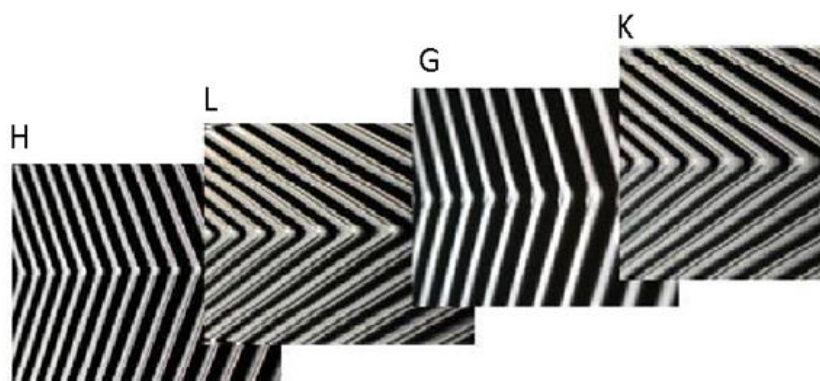


Рисунок 2.2 - Типи гофрування пластин.

Обрання того чи іншого типу пластин для пакету, встановлюваного в апараті, залежить від кола вирішуваних задач. Вони будуть впливати на технічні характеристики створюваних апаратів.

Кожухопластинчастий теплообмінник є одним із підтипів пластинчастих теплообмінних апаратів (ПТА), як спіральний ПТА, зварний ПТА, які дозволяють розширити робочі умови експлуатації ПТА (рисунок 2.3).

Теплообмінне обладнання повинно витримувати високі температури теплоносіїв та забезпечити стабільність роботи під високим тиском. Таким умовам відповідають три види пластинчастих теплообмінних апаратів: спіральний ПТА, ПТА типу компактблок і кожухопластинчастий теплообмінний апарат [6].

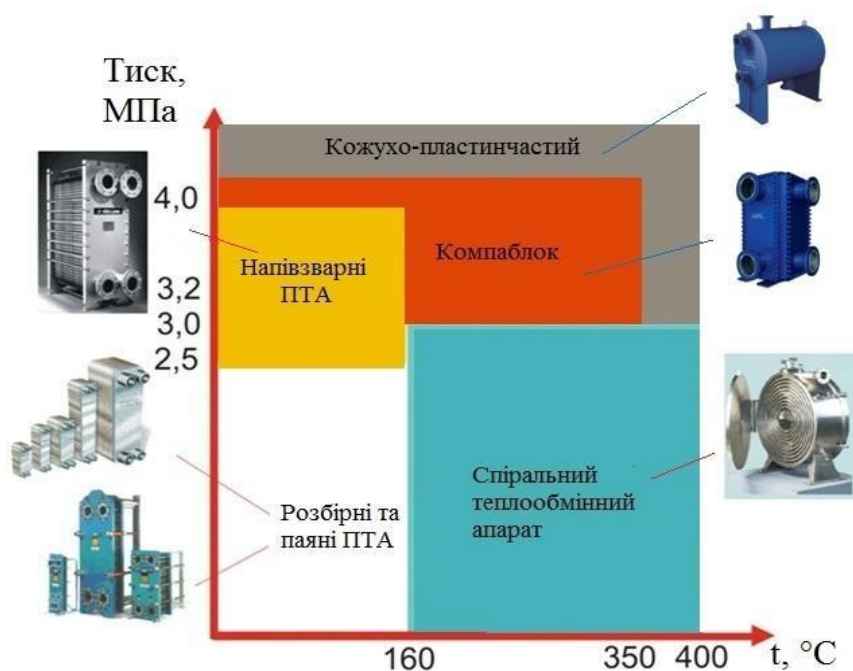


Рисунок 2.3 - Робочі умови експлуатації різних видів ПТА.

Спіральний теплообмінний апарат має спеціальну конструкцію для роботи з надзвичайно брудними рідинами, на позиціях, де потрібен теплообмін між середовищами з високим ступенем в'язкості і забруднення, включаючи середовища, що містять тверді волокна або частинки різногоумовного діаметра [7].

Спіральний теплообмінник складається з двох безперервних сталевих пластин однакової ширини закручених щодо загального центру – серцевини, виконаної у вигляді

труби. Закручуючись, пластини утворюють між собою зазор постійної величини (спіральний канал) (рисунок 2.3).

Потоки в каналах рухаються по концентричних колах, а шпильки створюють істотну турбулентність при низьких швидкостях і відповідно низьких значеннях числа Рейнольдса (Re). Ця особливість конструкції дозволяє добитися високої теплопередачі навіть для в'язких і дуже забруднених середовищ.

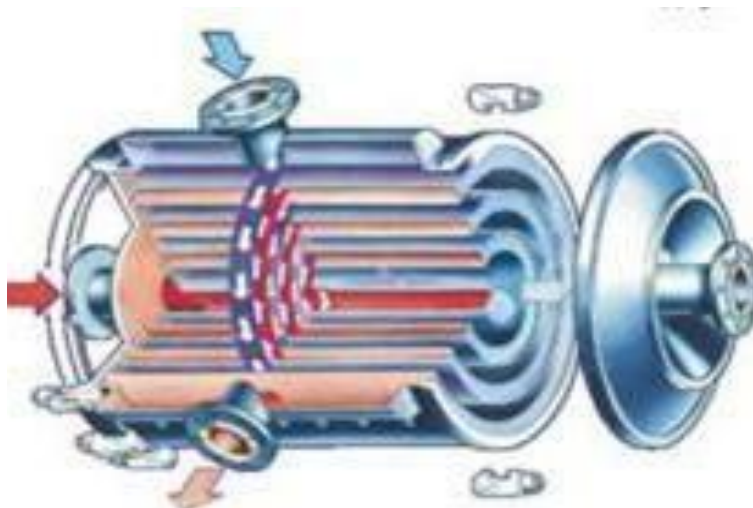


Рисунок 2.4 - Рух теплоносіїв в спіральному теплообмінному апараті.

Конструкції спіральних теплообмінників можуть витримувати тиск від вакууму до тиску більш ніж 4 МПа (рисунок 2.4) та працювати в діапазоні температур від $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Основними недоліками цього виду теплообмінників є складність виробництва та мала ремонтпридатність. Також не можна не відзначити, що механічне чищення спіральних теплообмінників практично неможливе. Чистку проводять тільки гідравлічним методом із застосуванням розчинів кислот. Це призводить до здорожчання виготовлення і обслуговування даного виду апаратів.

У 1985 році у Франції почалося виробництво зварних пластинчастих теплообмінників типу Компаблок. Він являє собою теплообмінний апарат з пакетом зварених попарно гофрованих пластин з нержавіючої сталі або спеціальних матеріалів, які формують канали. Кожна модель КПТА має свій стандартний набір пластин, що задовольняє самим різним технологічним вимогам.

Рух потоків здійснюється в каналах між гофрованими пластинами в перехресному напрямку в межах кожного ходу (рисунок 2.5а). В той час, як рух загального потоку в

багатоходовій конструкції організовано в режимі протитечії (рисунок 2.5б). При необхідності може бути спроектований теплообмінник, що працює в режимі паралельних потоків.

Рама Компблока складається з чотирьох кутових стоек, верхньої та нижньої плит і чотирьох бічних панелей з патрубками. Вся конструкція стягнута болтами і може бути швидко розібрана для проведення інспекції, сервісного обслуговування або чищення [8].

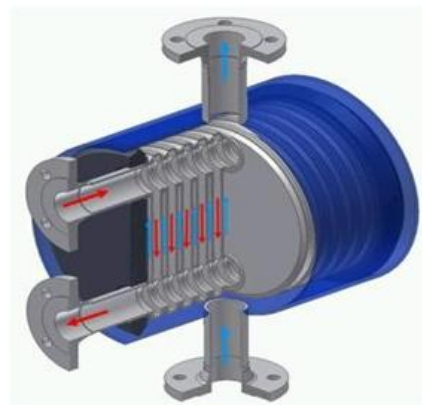
В даний час фірма Alfa Laval виробляє ПТА типу Компблок з сімома різними розмірами пластин від CP15 до CP120 з площею теплообміну від 0,7 до 840 м², та діапазоном робочих температур від –100 °С до 350 °С і з тиском від вакууму до 4 МПа.

Відповідно до даних, опублікованих Андерссоном та ін. на даний момент встановлено понад 750 ПТА типу Компблок на різних позиціях у нафтопереробних заводах світу, серед яких 200 апаратів були встановлені в блоці для підігріву сирої нафти.

Ще однією тенденцією у виробництві зварних ПТА стали кожухо-пластинчасті теплообмінники. Даний тип теплообмінника був розроблений в Фінляндії компанією Vahterus Oy і зареєстрований під торговим знаком Plate & Shell® (рисунок 2.5). Цей теплообмінний апарат складається з повністю зварного пакету гофрованих пластин круглої або заокругленої форми вміщеного у зовнішній кожух. Пластини спочатку зварюються попарно між собою в портах, а потім по периметру в пакет, який потім поміщається в циліндричний кожух. Така конструкція пакету пластин запобігає змішуванню рідин між каналами.



а)



б)

Рисунок 2.5 - Пластинчастий теплообмінний апарат з круглою пластиною: а – загальний вигляд, б – рух теплоносіїв в одноходовому теплообміннику.

Потік по стороні пластин входить і виходить через приєднувальні патрубки зварного пакета пластин. Ці патрубки вварені в кришку кожуха. Інший теплоносій

входить через присьднувальний патрубок, розташований на циліндричній поверхні кожуха, направляється в канали між пластинами за допомогою периферійних металевих направляючих і виходить через вихідний патрубок (потік по стороні кожуха) [9].

Рух потоків може бути реалізовано за принципом протитечії, прямотечії і перехресного потоку. При необхідності (малі різниці температур між теплоносіями) суцільнозварні теплообмінники можуть бути виготовлені багатоходовому виконанні, як по стороні пластин, так і по стороні кожуха. По стороні кожуха ходи формуються за допомогою спеціальних розділювачів і направляючих елементів.

Конструкція досить проста для того, щоб виробництво було економічним, а циліндрична оболонка здатна витримувати високий тиск. Даний тип теплообмінників може бути використаний для загальних функцій охолодження та нагрівання, як конденсатори, випарники, ребойлери та парогенератори. Спеціальні конструкції теплообмінних апаратів такого типу можуть працювати під тиском до 140 атм. і температурі до 900 °С. Стандартні конструкції витримують тиск 16, 25, 40 і 60 атм. і температури від -160 °С до 538 °С. Теплообмінники подібної конструкції виробляють такі підприємства як Alfa Laval, Sondex, Tranter. В Україні компанія Анкор-Теплоенерго починаючи з 1988 року випускає створені за аналогічним принципом теплообмінні апарати з заокругленою пластиною.

2.1 Методика розрахунку кожухопластинчастих теплообмінних апаратів

Процеси теплообміну в кожухопластинчастих теплообмінних апаратах (КПТА) відбуваються в каналах складної геометричної форми, утворених пластинами, штампованими з тонкоголистового металу. Форма гофрування пластин сильно впливає на теплопередачу і гідравлічний опір в каналах [10].

Зазвичай в КПТА використовуються пластини з прямолінійними гофрами, нахиленими під певним кутом β до вертикальної осі пластини (рисунки 2.6). Зібрані разом в апараті, вони утворюють канали сітчасто- потокового типу, які розрізняються складною геометричною формою і наявністю спільних точок прилягання між протилежними стінками в місцях перетину гофрування.

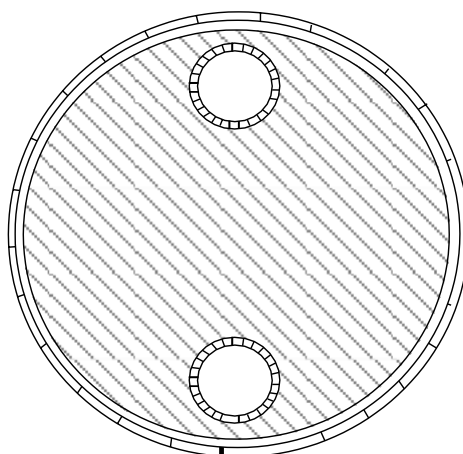


Рисунок 2.6 - Ескіз пластини КПТА:

Геометричні параметри пластин з різними типами гофрування (синусоїдальна і трикутна форма) приведені на рисунку 2.7.

Багатьма авторами були проведені комплексні дослідження гідравлічного опору і теплопередачі в таких каналах. У роботі В. Фоке та ін. було опубліковано дослідження гідравлічного опору в каналах з синусоїдальною формою гофрування з висотою $b = 5$ мм, . Мюлей і Манглік опублікували результати в каналах, утворених пластинами, що випускаються промислово, з $b = 2,54$ мм. У роботі Довіч та ін. наведені дослідження моделей каналів з гофрами висотою $b = 2$ мм. . Результати експериментів для каналів з трикутною формою гофрування висотою 5 і 10 мм були представлені Товажнянським [11].

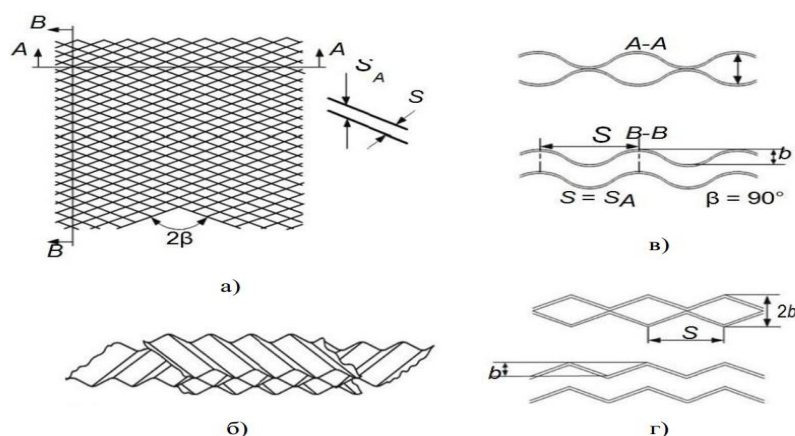


Рисунок 2.7 - Різні форми гофрування пластин КПТА: а, б – накладення суміжних пластин; в – перетин каналу при синусоїдальній формі гофри; г – перетин каналу при трикутній формі гофри.

Огляд і аналіз цих та інших робіт можна знайти в книзі Ванга та ін., в роботах Аюба та ін., і Кхана та ін. . В основному, автори узагальнювали отримані дані у вигляді окремих емпіричних залежностей для розрахунку коефіцієнтів гідравлічного опору і тепловіддачі, які справедливі тільки для досліджених каналів в обмеженому діапазоні гідродинамічних і теплових параметрів.

2.2 Гідравлічний опір в каналах КПТА

За основу беремо узагальнення даних відносно гідравлічного опору в каналах пластинчастих теплообмінних апаратів (ПТА) без урахування існування зон розподілу, які було запропоновано Мартіном в 1996 році на основі напівемпіричної математичної моделі потоку всередині каналів ПТА. У роботі наведено співвідношення, що виражає залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса і геометричних параметрів гофрування пластин. Але відхилення розрахунку для цього співвідношення від експериментальних даних інших авторів в деяких випадках досягає 50 % і більше. Д. Довіч та ін. у своїй роботі отримали аналогічні за точністю результати. Така низька точність узагальнення в згаданих роботах пояснюється використанням різних конструкцій експериментальних моделей у різних дослідників. В основному досліджувалися канали утворені пластинами, що випускаються промислово. Характерним для промислових пластин є існування зон розподілу потоку на вході та виході в канали теплообмінника [12].

Щоб виключити вплив зон розподілу на гідравлічний опір каналів ПТА, деякі автори, як В. Фоке та ін., Л.Л. Товажнянський та ін. проводили дослідження на моделях гофрованого поля каналів.

У своїй роботі В. Фоке та ін. повідомили про результати комплексного дослідження гідравлічного опору в каналах ПТА з синусоїдальною формою гофрування в широкому діапазоні кута нахилу β ($\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 72^\circ, 80^\circ$ і 90°). Після обробки експериментальних даних були отримані емпіричні співвідношення залежності гідравлічного опору (коефіцієнт тертя) δ від числа Рейнольдса.

Результати інших експериментальних досліджень впливу кута нахилу гофрування β на коефіцієнт тертя були опубліковані в роботі Л.Л. Товажнянського та ін. [11]. Експерименти проводилися на моделях каналів сітчасто-потокового типу, утворених пластинами з похилими гофрами трикутної форми, закругленою по краях. Висота гофри

в різних зразках варіювалася від 5 до 10 мм і β рівним 30° , 45° і 60° . Представлена наступна залежність гідравлічного опору:

$$\xi = \frac{0,34 \cdot \exp(1,52 \cdot \operatorname{tg} \beta)}{\operatorname{Re}^{0,25-0,06 \cdot \operatorname{tg} \beta}} \quad (2.1)$$

Для коректного порівняння результатів отриманих в роботах В. Фоке та ін. і Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО та ін., слід враховувати різницю у визначенні характерних лінійних розмірів каналу. При отриманні залежності В. Фоке та ін. використовували фактичну довжину каналу L , а в якості лінійного розміру еквівалентний діаметр, рівний подвоєній відстані між пластинами $d_e = 2b$. В роботі Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО та ін. при отриманні залежності (2.1) використовували в якості поздовжнього лінійного розміру розгорнуто в напрямку руху потоку довжину стінки каналу, а в якості поперечного характерного лінійного розміру використовували гідравлічний діаметр каналу, який визначається як чотири площі прохідного перерізу поділений на змочений периметр каналу. Залежність (2.1) дозволяє визначити гідравлічний опір в каналі для пластин з різними кутами нахилу гофрування. Але геометричний розмір каналу сітчасто-потокового типу складається ще з висоти гофрування та шагу гофрування, які однозначно визначають діаметр каналу та поперечний переріз для руху теплоносія в теплообмінниках [13].

Залежність для гідравлічного опору в каналах сітчасто-потокового типу, яка спирається на основні геометричні параметри каналу, була запропонована в роботі АРСЕНЬЄВОЇ на основі експериментальних даних, наведених у роботі ТОВАЖНЯНСЬКОГО та ін. Для порівняння використовували еквівалентний діаметр каналу $d_e = 2b$ і фактичну довжину каналу L . Отримані дані були узагальнені з використанням рівнянь, запропонованих Черчиллем для прямих труб. Це рівняння добре узгоджується з даними для прямих шорсткуватих труб для ламінарної і турбулентної течії і забезпечує плавний опис коефіцієнта тертя в області перехідного режиму течії. Рівняння надано у наступній формі:

$$\xi_s = 8 \cdot \left[\left(\frac{12 + p2}{\operatorname{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}}, \quad (2.2)$$

$$A = \left[p4 \cdot \ln \left(\frac{p5}{\left(\frac{7 \cdot p3}{\operatorname{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot 10^{-5}} \right) \right]^{16}; B = \left(\frac{37530 \cdot p1}{\operatorname{Re}} \right)^{16},$$

де p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 – параметри, що визначаються залежно від форми гофрування каналу.

$$p_1 = (\exp(-0,15705 \cdot \beta)); p_2 = \frac{\pi \cdot \beta \cdot \gamma^2}{3}; p_3 = \exp\left(-\pi \cdot \frac{\beta}{180} \cdot \frac{1}{\gamma^2}\right),$$

$$p_4 = (0,061 + \left(\left(0,69 + \operatorname{tg}\left(\beta \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right)^{-2,63}\right) \cdot (1 + (1 - \gamma) \cdot 0,9 \cdot \beta^{0,01}),$$

$$p_5 = 1 + \frac{\beta}{10}.$$

де $\gamma = 2 \cdot b / S$ – відношення висоти гофрування b до половини кроку гофри S ;

β – кут нахилу гофрування до вертикальної осі пластини, град;

$Re = w \cdot d_e \cdot \rho / \mu$ – число Рейнольдса;

w – швидкість потоку в каналі, м/с;

d_e – еквівалентний діаметр каналу, м;

ρ – густина рідини, кг/м³,

μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с.

В роботі О.П. Арсенєвої наведено результати порівняння розрахункових даних параметрів для гідравлічного опору за формулами (2.2) з даними інших авторів для різних геометричних форм гофрування з робіт В. Фоке та ін., Л.Л. Товажнянського та ін. і Д. Довіча та ін. Середньоквадратична похибка узагальнення дослідних даних для всіх досліджених в роботі форм гофрування становить $\pm 9 \%$, а з даними з роботи складає $\pm 6,5 \%$. Порівняння з даними для пластин з синусоїдальною формою гофрування показує, що характер впливу кута нахилу гофрування однаковий і цей вплив описується тією ж залежністю.

Порівняння з роботою Д. Довіча та ін. проводилися для двох експериментальних моделей каналів з кутами нахилу гофри синусоїдальної форми 28° і 65° . Дані збігаються з розрахунком досить добре. Розбіжність для $\beta = 65^\circ$ не більше 20% . Для $\beta = 28^\circ$ розбіжність досить велика, проте її можна вважати задовільною, враховуючи що вплив параметра γ визначалося за даними для пластин як з синусоїдальною, так і трикутною формою гофрування.

Використовування залежності (2.2) дає можливість визначити гідравлічний опір в каналах КПТА для різної геометрії пластин, та в широкому діапазоні чисел Рейнольдса, навіть для пластин нестандартної форми і гофрування.

2.3 Теплопередача в каналах КПТА

Для визначення тепловіддачі в каналах сітчасто-потокowego типу частіше використовують аналогію між передачею тепла та імпульсу, яка з початку була вірна для труб. Д. Довіч та ін. і Мартін використовували для узагальнення даних по теплопередачі в ПТА, опублікованих різними дослідниками, рівняння Левека. Попри те, що рівняння Левека було спочатку розроблено для визначення теплопередачі при ламінарному русі рідини, його застосування для турбулентного потоку в каналах КПТА, виявило в деяких випадках досить хорошу точність прогнозування яка дорівнювала 40–52 % [14]. Частково це можна пояснити спробою узагальнити дані для моделей гофрованого поля КПТА і дані для комерційних пластин, які враховують зони розподілу потоку пластини. Інша причина полягає в точності застосовуваних співвідношень між тепловіддачею і гідравлічним опором, які мають теоретичне обґрунтування для ламінарних потоків. В роботі О.Б. Аніпко представлені рівняння, спільне рішення яких дозволяє оцінити величину коефіцієнта теплопередачі на різних етапах експлуатації.

Арсеньєва та ін. запропонували узагальнення даних про тепловіддачі на основі значень гідравлічного опору для основного гофрованого поля каналу ПТА з використанням моделі турбулентного режиму і аналогією між передачею тепла і імпульсу. Для потоку в трубах та каналах сітчасто-потокowego типу така аналогія є правомірною. Найпростіша аналогія Рейнольдса і її різні модифікації досить добре описані в літературі (Шах і Секулік, Кутателадзе і Леонт'єв. Напівемпіричні моделі, розроблені на основі цієї аналогії, виявилися корисним для теоретичного аналізу різних явищ переносу. В роботі Л.Л. Товажнянський і П.А. Капустенко показали існування зв'язку між передачею тепла і імпульсу в каналах ПТА складної геометричної форми. Вона також використовувалася для передбачення теплопередачі в умовах конденсації та при виникненні забруднень на поверхні.

Передбачається, що співвідношення між теплопередачею і дотичним напруженням на стінці каналу в каналах КПТА є таким же, як і для труб. Іншими словами, припустивши, що еквівалентний діаметр, температурні умови і фізичні властивості обох потоків однакові, для рівного дотичного напруження на стінці коефіцієнти теплопередачі

в каналі КПТА і прямій трубі дорівнюватимуть. У безрозмірній формі його можна записати як:

$$Nu = \frac{h \cdot d_e}{\lambda} = Nu_0 = \frac{h_0 \cdot d_e}{\lambda}. \quad (2.3)$$

де h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К;

d_e – еквівалентний діаметр каналу, м;

λ – теплопровідність потоку, Вт/м·К.

Дотичне напруження на стінці визначається за такими формулами:

$$\text{-для прямої труби } \tau_{w0} = \frac{1}{8} \zeta_0 \cdot \rho \cdot W_0^2; \quad (2.4)$$

$$\text{-для каналу КПТА } \tau_w = \frac{1}{8} \zeta_\tau \cdot \rho \cdot W^2; \quad (2.5)$$

де W і W_0 – швидкості потоку в каналі КПТА і в трубі, м/с;

ρ – густина рідини, кг/м³;

δ_0 – коефіцієнт гідравлічного опору в прямій трубі, Па;

δ_τ – коефіцієнт гідравлічного опору в каналі КПТА, який враховує втрати тиску через тертя об стінку, Па.

Коли дотичні напруження (2.4) і (2.5) рівні, можна записати наступне рівняння:

$$Re^2 \cdot \zeta_\tau = Re_0^2 \cdot \zeta_0, \quad (2.6)$$

$$\text{де } Re = \frac{\rho W d_e}{\mu} \text{ і } Re_0 = \frac{\rho W_0 d_e}{\mu} - \text{числа Рейнольдса для труби і каналу КПТА;}$$

μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с.

Для турбулентного режиму течії рідини при $Pr = 1$ в прямій гладкій трубці справедлива аналогія Рейнольдса:

$$Nu_0 = Re_0 \cdot \frac{\zeta_0}{8}, \quad (2.7)$$

де коефіцієнт гідравлічного опору δ_0 можна розрахувати за рівнянням Блазіуса

$$\zeta_0 = 0,3164 \cdot Re_0^{-\frac{1}{4}}, \quad (2.8)$$

Підставивши рівняння (2.8) в рівняння 2.3, (2.6) і (2.7), і після перестановки, воно має вигляд

$$Nu = 0,065 \cdot Re^{\frac{6}{7}} \cdot (\zeta_{\tau})^{\frac{3}{7}}, \quad (2.9)$$

Припускається, що ефект від числа Прандтля на теплопередачу в діапазоні значень $0,5 \leq Pr \leq 20$ може бути прийнятий до уваги шляхом введення числа Pr , зведеного в ступінь 0,4. Для обліку зміни температури по перетину каналу вводиться множник (μ/μ_w) , зведений в ступінь 0,14. Потім модифікована аналогія Рейнольдса для каналу ПТА виражається наступним рівнянням:

$$Nu = 0,065 \cdot Re^{\frac{6}{7}} \cdot (\psi \cdot \zeta_{\tau})^{\frac{3}{7}} \cdot Pr^{0,4} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}, \quad (2.10)$$

де ψ – частка втрат тиску за рахунок тертя в загальному перепаді тиску;
 δ_s – сумарний коефіцієнт гідравлічного опору одиниці відносної довжини каналу, що враховує втрати тиску через тертя на стінці і від гідродинамічного опору форми, розрахований за рівнянням (2.10);

μ та μ_w – динамічна в'язкість при температурі потоку та стінки.

Основний параметр, який не відомий в рівнянні (2.10), це частка втрат тиску за рахунок тертя на стінці в загальному перепаді тиску ψ . Це значення можна оцінити шляхом порівняння з експериментальними даними потеплопередачі в моделях каналів КПТА.

У роботі Арсенєвої надані результати узагальнення експериментальних досліджень чотирьох зразків каналів ПТА, наведених у роботах Л.Л. Товажнянського і П.А. Капустенко. Аналіз отриманих даних привів до наступного висновку: розбіжність між розрахунками за рівнянням (2.10) для $\psi = 1$ з експериментальними даними зростає зі збільшенням кута гофрування β і числа Рейнольдса. В роботі запропоновано формулу, що описує залежність параметру ψ від β і значення числа Рейнольдса при визначенні Nu :

$$A = \frac{380}{[tg(\beta)]^{1,75}}, \quad (2.11)$$

$$\text{при } Re > A, \psi = \left(\frac{Re}{A} \right)^{-0,15 \cdot \sin(\beta)},$$

при $Re \leq A$, $\psi = 1$.

Рівняння (2.10) при ψ , розрахованому за формулою (2.11), дає середньоквадратичне відхилення приблизно 6 %. У своїй роботі Стогіянніс та ін. підтвердили точність рівняння (2.11) шляхом прямого розрахунку з використанням CFD-моделювання середнього дотичного напруження на стінці каналу КПТА, утвореного пластинами з $\beta = 45^\circ$.

Було визначено, що помилка розрахунку тепловіддачі, прогнозованою за запропонованою моделлю, не перевищує 15 % при наступних діапазонах параметрів гофрування: β від 14° до 65° ; γ від 0,5 до 1,5; F_x від 1,14 до 1,5. Результат розрахунків справедливий для чисел Рейнольдса від 100 до 25000 для синусоїдальної і трикутної форми гофрування пластин.

2.4 Висновки до розділу 2

1 Нерозбірна конструкція пластинчастих теплообмінних апаратів дозволяє значно збільшити область застосування компактних теплообмінників для підвищення ефективності теплопередачі і потенціалу енергозбереження нафто-хімічних комплексів.

3 Застосування ПТА типу Компаблок і кожухо-пластинчастих теплообмінників замість кожухотрубчастих дозволить зменшити площу теплопередачі і розміри самих теплообмінників в декілька разів, що дуже актуально при проектуванні нових заводів та модернізації існуючих. Для застосування зварних ПТА при переробці вуглеводнів необхідно розвинути підходи щодо їх проектування, які б спиралися на існуючі методи проектування розбірних ПТА.

4 Для розрахунку гідравлічного опору в каналах сітчасто-потокowego типу та варіювання геометричних параметрів теплообмінних пластин, з можливістю встановити оптимальну геометрію для бажаних умов експлуатації, перспективним бачиться використання залежності. Також вона дозволяє зважати на гідравлічний опір в зонах розподілення потоку, що призводить до більш точніших обчислень.

5 При встановленні тепловіддачі в каналах ПТА необхідно брати до уваги частку втрати тиску за рахунок тертя, що дозволяє зробити співвідношення. Необхідно точніше враховувати вплив числа Прандтля та показника при числі Прандтля в співвідношенні.

6 Для урахування забруднень на теплообмінній поверхні підхід асимптотичної поведінки забруднень дає гарні результати при їх прогнозуванні. Але для процесів переробки вуглеводнів необхідно встановити дані для сировини та залежності для визначення термічного опору у часі.

3 СТАН ПИТАННЯ ЗНИЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ В НАСЛІДОК НАКИПОУТВОРЕННЯ ТА КОРОЗІЇ

Утворення відкладень в теплообмінному обладнанні пов'язане перш за все з жорсткістю живильної води. Жорсткість води обумовлюється присутністю в ній солей кальцію і магнію. Розрізняють карбонатну (постійну) J_K , некарбонатну (тимчасову) $J_{нк}$ та загальну жорсткість, яка є сумою J_K та $J_{нк}$. Карбонатна жорсткість J_K обумовлена вмістом у воді бікарбонатів кальцію $Ca(HCO_3)_2$ та магнію $Mg(HCO_3)_2$, із ростом температури розчинність яких зменшується, і вони стають головною причиною утворення накипу. Некарбонатна жорсткість $J_{нк}$ обумовлюється вмістом у воді солей хлористого магнію $MgCl_2$ та кальцію $CaCl_2$, сульфату магнію $MgSO_4$, силікату кальцію $CaSiO_3$ та магнію $MgSiO_3$, які при кип'ятінні води не випадають у осадок [15].

В системах теплопостачання зустрічаються відкладення у вигляді накипу і шламу. Цей поділ ґрунтується на їх фізичних властивостях та є умовним. Чітко розмежувати накип та шлам неможливо, адже вони мають здатність в залежності від місцевих умов, переходити із однієї форми в іншу.

Відкладення, що зустрічаються у теплообмінному обладнанні, бувають різні за своїм складом, структурою, густиною і теплопровідністю, а за хімічним складом поділяються на 4 групи: лужноземельні, силікатні, залізисті і мідні [16].

Склад і види відкладень залежать від природи джерела водопостачання та від хімічного складу води. Згідно класифікації Валяшко М.Г. [17] виділяють три геохімічні типи природної води: карбонатний (специфічні компоненти карбонати та гідрокарбонати натрію), сульфатний (компоненти сульфати натрію і магнію, хлориди магнію) та хлоридний (головні компоненти – хлориди кальцію). Переважна більшість джерел водопостачання на території України відносяться до класу кальцієво-карбонатних вод, а основним з'єднанням накипних відкладень в котельному обладнанні є карбонат кальцію.

У природі зустрічаються дві основні модифікації карбоната кальція: кальцит та арагоніт. Кальцит тригональної системи кристалізується у формі ромбоєдрів, повздовжніх призм і т.д. Арагоніт відноситься до ромбічної системи і може набувати різної форми. Він утворюється у більш вузькому діапазоні фізико-хімічних умов у порівнянні з кальцитом і є менш розповсюдженою модифікацією. Як правило природних вод карбонат кальцію при пересиченні кристалізується у вигляді кальцита.

Відомо [18], що кристали у формі арагоніту мають нижче значення вільної поверхневої енергії у порівнянні з кальцитом. Тому у кристалів арагоніту нижча когезія до матеріалу теплообмінної поверхні, нижча когезія кристалів один до одного, що може призводити до зниження накипоутворюючої здатності карбоната кальція.

Процес утворення відкладень – складний механізм, який протікає у декілька стадій: утворення мікрокристалів солей, їх ріст, коагуляція з дисперсними частинками в більшій колоїдній з'єднанні; перенесення складових відкладень до стінок та їх осадження на поверхню під дією різних сил (сили тяжіння, Архімедової сили, динамічний напір потоку і т.д.), закріплення частинок під дією електрохімічних сил, видалення або звичайне змивання під дією потоку, старіння відкладень через впарювання, рекристалізації солей, при яких структура відкладень стає щільнішою.

Основною умовою утворення твердої фази деякої солі $Kt_n An_m$ у воді при даній температурі є пересичення по цьому з'єднанню, де $[Kt]$ і $[An]$ – концентрації катіонів та аніонів даної солі.

Якщо у розчин, який знаходиться у насиченому зрівноваженому стані, вносити додаткову кількість солі з одним із присутніх у нерівності іонів, то випадіння твердої фази буде продовжуватися до вирівнювання правої і лівої частини виразу. Якщо у розчин вносяться солі, які не мають спільних іонів з розчиненою в ньому сіллю, то при малій мінералізації це призведе до збільшення розчинності за рахунок зменшення коефіцієнту активності.

Для оцінки накипоутворюючої здатності води у практику організації водно-хімічного режиму систем теплопостачання був введений нормативний показник карбонатний індекс (I_K), який дорівнює добутку кальцієвої жорсткості на загальну жорсткість води. Правилами технічної експлуатації нормуються значення I_K , при яких інтенсивність накипоутворення не перевищує $0,1 \text{ г}/(\text{м}^2\text{год})$.

Відомо [19], що шорсткість і рельєф поверхні також впливають на інтенсивність утворення відкладень. На більш шорстких поверхнях інтенсивність відкладення вища, оскільки нерівності стають центрами кристалізації в ламінарному пристінковому шарі.

Вплив технологічних параметрів на процеси утворення та відкладень описано в роботах [20]. Швидкість теплоносія та режим течії (значення числа Re) впливають на процес осадження частинок з потоку на функціональних поверхнях. Основні властивості частинок, що впливають на процес осадження з потоку, – розмір і густина. Невеликі частинки з

розміром до 0,5 мкм під дією броунівського руху не осаджуються на поверхні. Для частинок розміром близько 1 мкм гідродинамічні параметри потоку стають визначальними.

Найбільш вагомим фактором, який впливає на процес утворення відкладень, є температура теплоносія. Відомо, що при температурі 60-70 °С в основному осаджується карбонат кальцію $CaCO_3$, при 70-100 °С – гідроксид магнію $Mg(OH)_2$, а при температурі вище 100 °С осад складається із кристалогідратів та сульфату кальцію $CaSO_4$. Тиск теплоносія також впливає на розчинність: з підвищенням тиску розчинність карбонату кальцію збільшується.

Згідно результатів експериментальних досліджень [21] описаних в стосовно умов експлуатації закритих систем теплопостачання виявлено, що кінетика процесу накопичення на теплообмінних поверхнях у діапазоні швидкостей течії 0,2-1,0 м/с і температурі теплоносія 50 – 90°С як на гріючих, так і на нагріваючих поверхнях має однаковий характер і характеризується трьома яскраво вираженими періодами: перший - початковий період, характеризується найбільшою інтенсивністю росту відкладень, другий – перехідний період, який характеризується суттєвим уповільненням швидкості накопичення відкладень, третій – сталий період, характеризується стабілізацією процесу і сталою швидкістю накопичення відкладень (рисунок 3.1). Процес накопичення відкладень на теплообмінних поверхнях при течії теплоносія описують залежності типу [22].

$$G^I = \alpha \cdot \tau$$

$$G^{II} = b + c \cdot \tau^k$$

$$G^{III} = d + f \cdot \tau$$

де, G^I , G^{II} , G^{III} - кількість накопичених відкладень у початковий, перехідний і сталий період, кг/м²; τ - час, с.

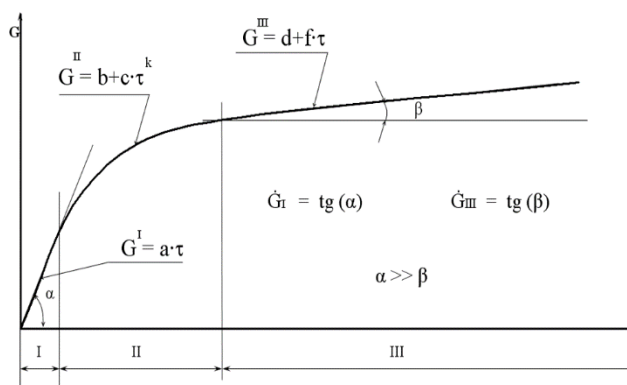


Рисунок 3.1 – Крива кінетики процесу накопичення відкладень на сталевих теплообмінних поверхнях обладнання систем теплопостачання.

3.1 Вплив відкладень на теплообмін в кожухопластинчастих теплообмінних апаратах

Утворення шару відкладень товщиною 1 мм за даними різних джерел погіршує процес теплообміну на 5-20% в залежності від її складу і типу котла, і веде за собою перевитрати палива на 5-8%. За рахунок різних значень коефіцієнтів теплопровідності металу та утвореного шару відкладень, збільшення товщини останнього призводить до зниження температури теплоносія.

Різниця температур теплообмінної поверхні і потоку теплоносія прямо впливає на процес утворення відкладень, чим більша ця різниця, тим більша температурна нерівномірність потоку (рисунк3.2). Підвищення температури теплоносія у пристінковому шарі веде до більш інтенсивного випадіння твердої фази. Внаслідок порушення рівноваги інтенсифікується процес дифузійного переносу розчинених домішок з центральної частини потоку до пристінкового шару, тим самим стимулюючи утворення нової твердої фази і відкладень [23,24].

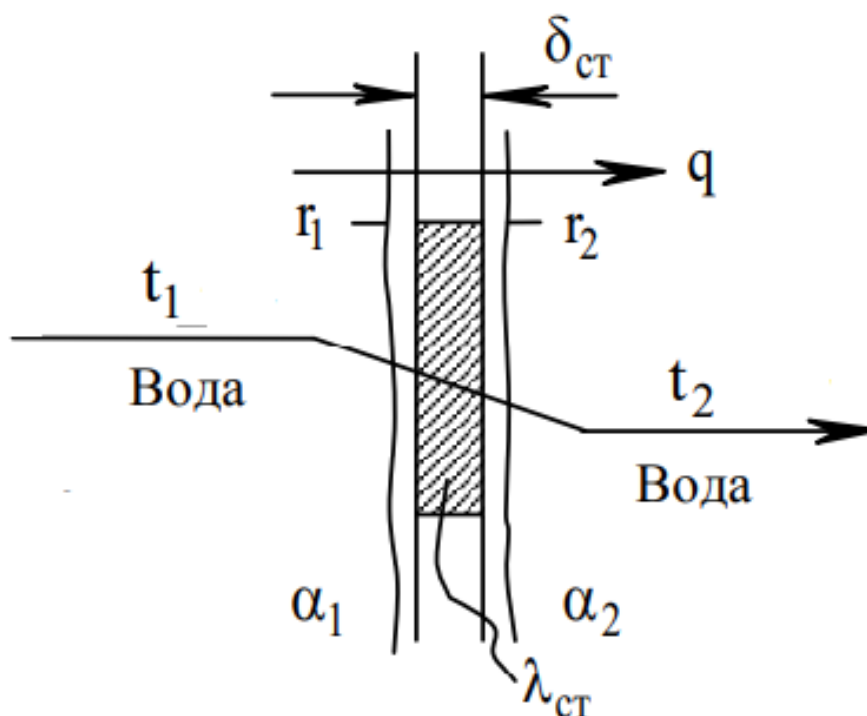


Рисунок 3.2- Передача теплоти через чисту поверхню нагріву

α_1 - коефіцієнт тепловіддачі від перегрітої пари до стінки, Вт/м² К; α_2 - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до потоку води, Вт/м² К. α_1 , α_2 , визначаються за допомогою

емпіричних рівнянь подібності для тепловіддачі в умовах плівкової конденсації та вимушеного руху рідини в трубах відповідно.

Підвищення температури стінки t_{cm} труби в результаті утворення накипу описує рівнянням показано формулою (3.1)

$$t_{cm} = t_{\sigma} + \frac{\sigma_{vid}}{\lambda_{vid}} q + \frac{q}{\alpha} \quad (3.1)$$

де t_{σ} - температура середовища (води), °C;

$\sigma_{vid}, \lambda_{vid}$ - товщина та теплопровідність відкладень, м; Вт/(м · К);

α - коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до середовища, Вт/м² К.

Останні визначаються за відомою формулою (3.2) з методики Равича [25]

$$q_2 = \frac{t_{\sigma}'' - t_n}{t_{\sigma}' \left[C' + (h-1) Bk \right]} 100\% \quad (3.2)$$

t_{σ} - температура повітря, яке йде на горіння, °C;

t_{σ} - калориметрична температура горіння, °C;

h - коефіцієнт розбавлення димових газів.

У найбільшій мірі на теплопровідність відкладень впливає їх пористість. Зниження пористості призводить до росту теплопровідності. Найменшу теплопровідність мають відкладення, які містять у своєму складі продукти термолізу органічних з'єднань, а також силікатні відкладення, найбільшу – карбонатні відкладення [26].

Оскільки відкладення мають низьку теплопровідність, то навіть дуже малий шар накипу призводить до різкого погіршення умов охолодження металу поверхонь нагріву і до підвищення його температури. При цьому біля поверхні нагріву, які знаходяться в області високих температур (екрани, фестони, перші ряди труб конвективного пучка), температура металу може перевищити граничну за умовами міцності, після чого починається зменшення товщини стінки труби.

Величина теплопровідності різних видів накипу в залежності від її складу наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Теплопровідність різних видів накипу

Вид відкладень та її хімічний склад	Характер відкладень	λ , Вт/(м · К)
Накип, просочений маслом	тверді	0,1 - 0,15
Силікатна із вмістом кремнекислих з'єднань 20% і вище	тверді, щільні	0,25 - 0,5
Карбонатна із вмістом CaCO_3 і MgCO_3 до 70%		
аморфного типу	м'які	0,2 - 1
твердого типу	від аморфного порошку до твердого котельного каменю	0,5 - 5,5
Сульфатна (гіпсова) із вмістом гіпсу CaSO_4 більше 50%	тверді, щільні	0,5-2,5
Накип, який складається з оксидів заліза	тверді	4,6 – 5,7

Згодом з'являється свищ – отвір вздовж утворюючої труби, через який з великою швидкістю витікає вода, і котел доводиться зупиняти. Відкладення недопустимі і на поверхнях нагріву, які розміщені в зоні більш низьких температур, так як це призводить до зниження ККД котла в результаті зменшення коефіцієнта теплопередачі і пов'язаного з цим підвищенням температури димових газів [27].

Однак у реальних умовах при експлуатації водогрійних котлів і теплообмінників накип на стінках є не однотипна, а її товщина різна в залежності від конструктивної частини апарату [28].

При рівномірному розподіленні теплових потоків кількість відкладень на окремих трубах екранів в основному однакове. Незначне їх збільшення може бути у районі пальників, а зменшення – у районі поду. На трубах конвективних поверхонь відкладення також в основному рівномірно розподіляються по периметру труб, а кількість їх, як правило, менші, ніж на трубах екранів. Однак на відміну від екранів на окремих трубах конвективних поверхонь різниця у кількості відкладень може бути значною [29].

Корозія представляє собою процес руйнування металу у результаті хімічних та електрохімічних процесів. За характером корозійних руйнувань розрізняють такі види корозії: загальну або суцільну корозію, що охоплює всю поверхню металу, та локальну

(місцеву) корозію, коли руйнування локалізується на окремих ділянках поверхні. Загальна корозія поділяється на: рівномірну, нерівномірну і вибірккову.

В умовах роботи систем теплопостачання основним видом внутрішньої корозії є корозія в об'ємі електроліту (води). Крім того зустрічається виразкова корозія, тобто електрохімічна корозія, яка викликана контактом металів, які мають різні потенціали корозії у воді. А також щілинна корозія - корозія руйнування у щілинах між металами [30].

Основним профілактичним методом, який направлений на попередження корозії теплоенергетичного обладнання і трубопроводів, є деаерація – остання стадія комплексного технологічного процесу водо підготовки. Деаерація проводиться з метою видалення з живильної води котлів і підживлювальної тепломереж розчинених корозійно-активних газів. Для ефективного захисту від корозії необхідне видалення газів до дуже низьких залишкових концентрацій: для котлів – до 0,08% від початкового значення, а для теплових мереж – до 0,4%. Тобто фактично необхідно знижувати кількість розчинених газів у 250 – 1250 разів. Як правило видалення з води 90-95% газів не є технічно складно, однак у зв'язку з тим, що швидкість видалення газів уповільнюється по мірі зниження залишкової концентрації, саме ці 5-10% газів і призводять до руйнування металу теплоенергетичного обладнання і трубопроводів. Окрім того збільшення залишкової концентрації викликане присосами через нещільності арматури та негерметичності трубопроводів.

До основних корозійно активних газів відноситься кисень O_2 і вуглекислий газ CO_2 , які розчиняються у воді при її контакті з атмосферним повітрям. Додатково зв'язана вуглекислота з'являється у воді на стадії пом'якшення у іонообмінних фільтрах. З інших розчинених газів у воді систем теплопостачання зустрічається хлор Cl_2 і його з'єднання, що надходить у воду при хлоруванні води, водень H_2 – при корозії внутрішніх теплообмінних поверхонь, аміак NH_3 – в результаті амінування живильної води, сірчастий ангідрид SO_2 і сірководень H_2S – при обробці води сульфідом натрію, азот N_2 по відношенню до корозії є нейтральним. Крім тогоу артезіанських водах інколи зустрічається метан CH_4 та інші гази.

На сьогодні використовується хімічний, акустичний, термічний та гідродинамічний способи видалення розчинених газів з води. Хімічний спосіб використовується у системах з невеликою витратою води. До нього відноситься обробка води гідразином, залізом, сульфитування. Основним обмеженням хімічного способу є висока вартість і токсичність реагентів, додаткові витрати на контроль за їх

концентрацією у системі, видалення продуктів їх реакції, а також великі затрати на експлуатацію хімічних установок. Крім того, хімічний спосіб потребує постійного контролю та переналагодження установки при зміні складу води, зокрема при сезонних змінах якості поверхневих вод.

Акустичний спосіб деаерації полягає у впливі на попередньо дисперговану воду ультразвуковими хвилями. При такій обробці ультразвуком відбувається зниження розчинності газів на 30-50%, підвищенню рухливості газів, що призводить до коагуляції пухирців з наступним виходом з води під дією Архімедової сили [31]. У результаті акустичної обробки з води видаляються всі розчинені гази, окрім зв'язаних форм CO_2 . Недоліком способу є невисока глибина деаерації, велика енергозатратність (до 1кВт/м^3 обробленої води).

Традиційним способом видалення з води всіх розчинених газів в теплоенергетиці є термічна або дифузійна десорбція. Десорбція полягає у процесі встановлення рівноваги між рідкою та парогазовою фазами у відповідності до закону Генрі – концентрація розчиненого газу пропорційна парціальному тиску цього газу над поверхнею рідини [32].

Отже, відкладення і корозія у значній мірі впливає на енергоефективність роботи систем теплопостачання; поряд з перевитратою палива постає питання перевитрати електроенергії, оскільки за рахунок зменшення прохідної площі трубопроводів збільшується навантаження на мережні насоси. Схематично вплив відкладень на теплообмінних і трубних поверхнях на надійність та ефективність їх роботи представлений на рисунку.

3.2 Застосування поверхнево-активних речовин у теплоенергетиці

Поверхнево-активні речовини (ПАР) в теплоенергетиці донедавна були відомі як високоефективні інгібітори корозії. При додаванні їх до теплоносія на поверхні металу формуються молекулярні шари. Адсорбуючись на поверхні металу, молекули утворюють «частокол» Ленгмюра», який являється перешкодою для проникнення до неї корозійно-активних молекул кисню та вуглекислоти. Завдяки утвореній плівці доступ корозійно-активних іонів зупиняється, а швидкість корозії уповільнюється.

Підбір інгібіторів повинен здійснюватися з врахуванням вимог правил [33]. При використанні ПАР у відкритих системах теплопостачання живильна і підживлювальна вода додатково повинна відповідати вимогам [34], а реагенти-інгібітори мають бути безпечними для здоров'я людей.

Відомо [35], що характерною особливістю будови молекул поверхнево-активних речовин є полярна голова та неполярний хвіст. На поверхні металу велика молекула орієнтується вуглеводневим радикалом до твердої поверхні, а полярною групою у воду (рисунк3.4), утворюючи гідрофобний шар (рисунку 3.3).

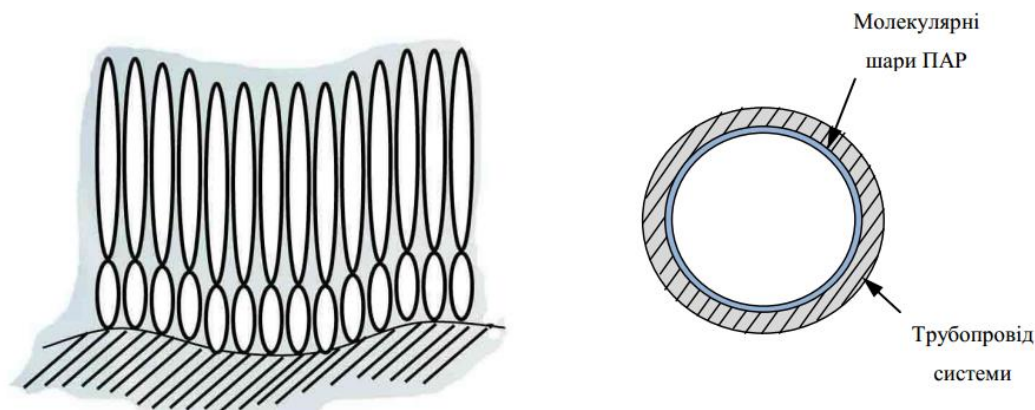


Рисунок. 3.3 - Розміщення молекул ПАР на металевій поверхні

На цьому гідрофобному шарі може утворюватися другий шар, полярні групи якого орієнтовані у воду, а неполярні – до першого шару. При цьому поверхня спочатку гідрофобізується, а потім гідрофілізується, що обумовлюється наявністю максимуму на кривій залежності кута змочування від концентрації ПАР. Ступінь турбулізації потоку у пристінкових шарах знижується за рахунок гідрофобізації поверхні [36,37].

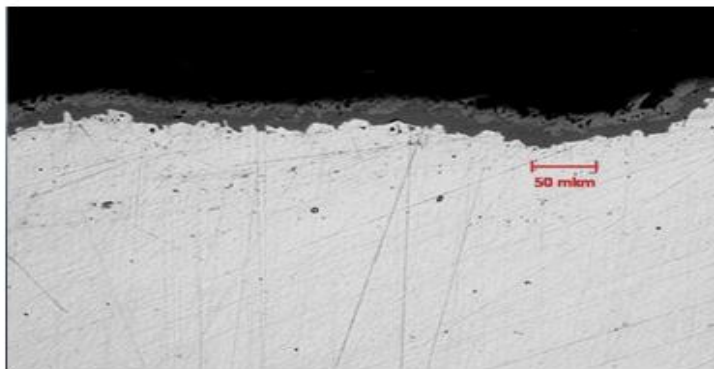


Рисунок 3.4 - Формування захисного шару з молекул ПАР на поверхні металу.

Одним з важливих ефектів використання ПАР у водному потоці є ефект Томса, який проявляється у значному зниженні гідравлічного опору. Це поклало початок широким дослідженням течії з добавками високомолекулярних ПАР [38].

Відомо, що гідравлічний опір трубопроводу визначається із залежності Дарсі- Вейсбаха, формула (3.3).

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho w^2}{2} \quad (3.3)$$

де Δp – перепад тиску, Па;

λ – коефіцієнт гідравлічного тертя;

l довжина трубопроводу, м;

d - діаметр трубопроводу, м;

ρ – густина рідини, кг/м³;

w – швидкість течії рідини, м/с.

З рівняння (3.3) видно, що на гідравлічний опір найбільшою мірою впливає діаметр трубопроводу, швидкість руху теплоносія та коефіцієнт опору, який залежить від числа Re і еквівалентної шорсткості. Корозійні процеси значно збільшують шорсткість поверхні трубопроводів і прискорюють процес накопичення відкладень на теплообмінних поверхнях.

Встановлено [39], що кондиціонування внутрішніх поверхонь трубопроводів щільними мономолекулярними шарами ПАР у діапазоні швидкостей теплоносія від 0,5 до 2,5 м/с призводить до зниження гідравлічного опору магістральних та розвідних трубопроводів на 25-30% і підвищення внутрішнього ККД мережних насосів до 4%. Шляхом використання волокон та полімерів можливо досягти зниження гідравлічного опору до 80% [40].

Риженковим А.В. і колегами [41] було досліджено чотири основних етапи зміни гідравлічного опору трубопроводу Δp системи тепlopостачання. На першому етапі відбувається пониження гідравлічного опору за рахунок формування молекулярних шарів ПАР, які повністю повторюють профіль поверхні. На другому етапі спостерігається стабілізація значень Δp , яка характеризується поступовим заповненням молекулами простору між виступами шорсткості до повного її згладжування. Максимальне значення зниження Δp трубопроводу досягається на третьому етапі. На останньому етапі відмічається зворотній процес – гідравлічний опір збільшується до стабілізації в діапазоні 5-10% від вихідного значення. Отже, модифікація трубних поверхонь шляхом формування

молекулярних шарів ПАР веде до зміни профілю швидкості течії теплоносія. При цьому профіль швидкості теплоносія наближається до профілю швидкості в абсолютно гладкій трубі.

Відомо, що доданки молекул ПАР здатні знижувати швидкість накопичення термобар'єрних відкладень [42-47]. Модифікування теплообмінних поверхонь молекулами поверхнево-активних речовин у діапазоні температур 50-90 °С і швидкості течії теплоносія 0,2-1 м/с призводить до значного зниження (у 5-20 разів) швидкості накопичення відкладень.

Присутність молекул ПАР у воді сприяє зниженню поверхневого натягу σ і підвищенню її текучості. Великі за розміром молекули ПАР потрапляють у мікропори і тріщини відкладень. За рахунок розклинюючого тиску відбувається відшарування і руйнування сольових відкладень. Аналіз джерел [48-50] дозволив встановити, що розчини, які використовувалися у експериментах, складалися не тільки з речовин класу аміни. Суміші ТМС ДТ та Дифалон багатокомпонентні, до їх складу входять кислоти та інгібітори корозії. Дифалон відносять до III-о токсикологічного класу небезпеки, концентрат здатний викликати опіки живої тканини [51-53].

Підсумовуючи вищесказане, можна зробити висновок, що одержані результати стосовно впливу ПАР на термобар'єрні відкладення та накіп потребують додаткового вивчення, а необхідність екологічно безпечного реагенту для реалізації та просування ПАР-технології у об'єкти житлово-комунального сектору країни є дуже гострою.

3.3 Вплив поверхнево-активних речовин на тепломасообмін та гідродинаміку

Велика кількість позитивних властивостей ПАР породило проблему вибору оптимальних доданків для регулювання фізичних процесів у різних галузях промисловості [54]. Так, для роботи теплоенергетичного обладнання основними критеріями вибору є: суттєве зниження поверхневого натягу (на 40-50%); значна адсорбція на рідких та твердих поверхнях; інгібування корозійних процесів; відсутність піноутворення; термостійкість; низька ступінь деструкції; відсутність гелеутворення при низьких температурах водного розчину ПАР; мінімальна токсичність та біологічний розклад; відсутність галогенідів і з'єднань сірки; негорючість; наявність надійного джерела отримання ПАР; його невисока вартість.

Одним з найважливіших ефектів використання ПАР у потоці рідини є ефект Томса, який проявляється у значному зниженні гідродинамічного опору (до 80%). Це поклало початок широким дослідженням течій з додаванням високомолекулярних, а пізніше і низькомолекулярних ПАР.

Дослідження показують, що доданки ПАР приводять до змін характеристик турбулентних потоків, в основному пристінної турбулентності. При введенні доданків у турбулентний потік відбувається його «ламініризація» що перш за все проявляється у характерній зміні розподілу середньої швидкості по висоті пограничного шару та температур, а також відношення між інтенсивністю поперечних і повздовжніх пульсацій.

На ряду з позитивними якостями, що приводять до значного зниження гідродинамічного опору, високомолекулярні ПАР мають ряд суттєвих недоліків. З точки зору практичного застосування в енергетиці головними з них є ймовірність деструкції і розкладу при високих температурах. Ці недоліки не властиві низькомолекулярним ПАР, які також мають здатність знижувати гідродинамічний опір, однак при значно більшій концентрації у порівнянні з полімерними високомолекулярними ПАР. При використанні доданків лужних металів і амонієвих миль, молекулярна маса яких не перевищує декількох сотень, отримано зниження опору до 20% від початкового значення. Як відзначається у дослідженнях [55] при проходженні насосів, місцевих опорів низькомолекулярні ПАР відновлюють свою гідродинамічну ефективність.

Відмічено, що при $t < 10-13$ °C ефект зниження гідродинамічного опору зникає, що пояснюється зменшенням розчинності ПАР при низькій температурі і переході його у тверду фазу, і як наслідок приводить до зниження інтенсивності міцелоутворення.

Зменшення впливу доданків ПАР на гідродинамічний опір спостерігається і при високих температурах. Це можна пояснити так званою термічною деструкцією – дезагретуючим впливом теплового руху на процес міцелоутворення.

У роботі [56] встановлено вплив діаметра труби на коефіцієнт тертя при різних числах Re - з ростом числа Re вплив діаметра стає менш суттєвим. Аналіз експериментальних даних показує, що максимальне зниження опору $\epsilon = (\lambda_0 - \lambda_p) / \lambda_0$ для труб d_1 і d_2 виявилося майже однаковим і дорівнює $\epsilon \approx 20\%$. На основі чого авторами було зроблено висновок про те, що максимальне зниження опору терся у технічно гладких трубах визначається тільки концентрацією розчину і не залежить від діаметра труби.

При додаванні різних речовин до експериментальної рідини може змінюватися не тільки поверхневий натяг σ чи в'язкість, але і фізико-хімічні властивостей поверхонь нагріву і перш за все змочуваність. Змочуваність характеризується красивим кутом θ , який утворюється між стінкою та вільною поверхнею рідини. З ростом θ змочуваність поверхні зменшується. Змочуваність впливає на теплообмін через зміну параметрів, які характеризують процес пароутворення: число центрів пароутворення, форма і розміри пухирців, частота їх відриву.

Зміна структури турбулентних потоків, гідрофобізація поверхонь, їх очищення від відкладень, зміна дисперсної і хвильової структури потоків і плівкових течій - ці та інші ефекти, зумовлені доданками ПАР і полімерів, справляють істотний і неоднозначний вплив на процеси тепломасообміну. Обулікована велика кількість наукових робіт на цю тему, зокрема проаналізовано [57,58]. Основна увага у літературі приділена процесам кипіння і конденсації, широко поширеним в теплоенергетичних установках різного призначення

Зниження гідродинамічного опору при турбулентній течії слабких розчинів полімерів і міцелоутворюючих ПАР призводить до зниження тепловіддачі при обтіканні чистих поверхонь теплообміну. Це явище обумовлене виникненням анізотропії динамічної в'язкості в турбулентних потоках з добавками ПАР.

Дослідження теплообміну зі слабкими розчинами високомолекулярних ПАР ($c \approx 10^{-2}$ мг/л) поліетиленоксиду і поліакріламиду (ПАА) в діапазоні чисел $Re = (1 \div 3,6) \cdot 10^4$ описане в [59]. Досліджувалася течія в круглій мідній трубі з внутрішнім діаметром $d = 10^{-2}$ м і довжиною $l = 0,8$ м. Цей канал мав попередньо включену ділянку гідродинамічної стабілізації. Нагрівання здійснювалося рівномірно намотаною на зовнішню поверхню труби ніхромовою стрічкою. Одночасно з вимірюванням коефіцієнта тепловіддачі визначався і гідравлічний опір. В результаті при течії з добавками зафіксовано суттєве зниження тепловіддачі в порівнянні з тепловіддачею при турбулентному протіканні води для незмінних інших умов ($Re = \text{const}$). Експерименти показали, що для розчинів полімерів, що не зазнали значної деструкції, відносне зниження коефіцієнта тепловіддачі значно більше, ніж коефіцієнта опору. Довжина ділянки теплової стабілізації при добавках полімерів зростає у 2-3 рази у порівнянні з довжиною при течії чистої води. Вимірювання турбулентних пульсацій показали, що зменшення інтенсивності поперечних турбулентних пульсацій призводить до деформації профілю середньої швидкості в проміжній області і суттєвого зростання її термічного опору. Ця область збільшується за своїми розмірами, а логарифмічна ділянка профілю

температури зсувається вгору. Це зміщення тим більше, чим більший ефект зниження опору.

Ступінь зниження інтенсивності теплообміну та її зв'язок із зниженням гідравлічного опору при добавках полімерів досліджувався у роботі [57]. Відзначається, що максимум зниження опору при деякій оптимальній концентрації полімеру у воді $C_{\text{опт}}$ відповідає максимуму зниження теплообміну. Найбільший ефект отриманий для добавок поліетиленоксиду. При $Re = \text{const} = 2 \cdot 10^4$ та оптимальної концентрації $C_{\text{опт}} = 6 \cdot 10^{-3}\%$ зниження опору склало 39%, зниження теплообміну 65%. Експерименти з водним розчином поліетиленоксиду показали, що із зростанням молекулярної маси добавки M_g ефект зниження теплообміну та гідравлічного опору зростає. Це узгоджується з висновками про те, що ефективність дії добавки певного виду пропорційна добутку концентрації на молекулярну масу. Так, при $Re = 2 \cdot 10^4$ у разі ПАР з $M_g = 12,9 \cdot 10^6$ отримано при $C_{\text{опт}} = 9 \cdot 10^{-3}\%$ зниження опору на 27%, теплообміну на 46%; при $M_g = 4,7 \cdot 10^6$ $C_{\text{опт}} = 4 \cdot 10^{-3}\%$ зниження опору 21%, теплообміну 39%. Аналогічні ефекти зафіксовані і для низькомолекулярних добавок (наприклад, добавки полі-*N*-(*N*-реніл)-вінілнафтіламіна $M_g = 2 \cdot 10^3$). Тут максимальний ефект досягається при значно більших концентраціях $C_{\text{опт}} = 1,6 \cdot 10^{-1}\%$, максимальне зниження опору 27%, теплообміну 38%.

Механізм зниження інтенсивності теплообміну в потоках з ПАР і його зв'язок зі зниженням гідродинамічного опору розглядалися у роботі [71]. Як для високомолекулярних, так і для міцелотворюючих ПАР зниження інтенсивності поперечних пульсацій і тепломасообміну зв'язується з орієнтацією міцел поверхнево-активних речовин або асоціатів полімерів по потоку.

При аналізі особливостей впливу ПАР різної природи на гідравлічний опір і тепломасообмін виділяються два граничних випадки: перший - ПАР впливають лише на пристінну область течії (слабкі полімерні розчини) і другий - ПАР змінюють закономірності турбулентного обміну в ядрі потоку (течії асиметричних частинок, волокон). Дослідження проведено на основі тришарової моделі турбулентної в'язкості.

Особливості впливу ПАР різної природи на закономірності теплопереносу залежності відношень критерія Стантона $\overline{St} = \frac{Nu}{Re Pr} = \frac{\alpha}{\rho c_p u}$ відношення коефіцієнтів опору при $\lambda = \lambda_p / \lambda_0$ різних критеріях Прандля Pr) за розрахунками представлені на рисунку 3.5.

На основі тризонної моделі процесу масопереносу в турбулентних ньютонівських течіях в [60] розроблено модель турбулентного тепломасопереносу у слабких розчинах полімерів, коли спостерігається зниження гідродинамічного опору.

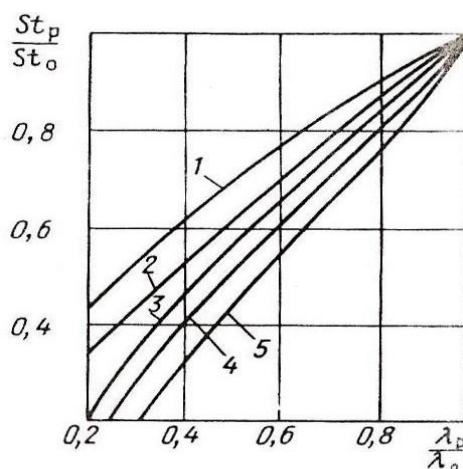


Рисунок 3.5 - Вплив доданків на процеси тепло- масообміну і його зв'язок зі зниженням гідралічного опору числа Прандтля Pr .

З рисунку видно, що при впливі доданків ПАР на область в'язкого підшару зниження рівня теплопереносу при $Pr > 1$ більш значне, ніж зниження опору, що відповідає дослідним даними, описаним вище. Вплив доданків на турбулентне ядро потоку призводить до іншого результату, в цьому випадку зниження опору перевершує зниження теплопереносу практично при всіх числах Прандтля.

При цьому використано співвідношення для коефіцієнта гідралічного опору слабких розчинів полімерів при максимальному його зниженні. Отримано наступний вираз для числа Шервуда при течії в гладких трубах.

$$Sh = \frac{kd}{D} = 0,0133 Sc^{1/3} Re^{0,725} \quad (3.4)$$

де k - коефіцієнт масопереносу;

D – коефіцієнт дифузії, m^2/s ;

$Sc = \nu / D$ - число Шмідта.

Для ньютонівської течії (без ПАР) отримано співвідношення

$$Sh = 0,015 Sc^{1/3} Re^{0,88} \quad (3.5)$$

Основна відмінність (3.4) і (3.5) у показнику степеня числа Re та коефіцієнті. Замінюючи в (3.4) і (3.5) Sh на Nu , Sc на Pr , отримано вираз для розрахунку теплообміну в гладких трубах при течії з максимальним зниженням гідравлічного опору у слабких розчинах полімерів.

$$Nu = A Pr^n Re^m \quad (3.6)$$

Для чистої води рівняння має коефіцієнти $A = 0,0133$; $n=0,33$; $m=0,725$, а для слабого розчину ПАР $A = 0,015$; $n=0,33$; $m=0,88$.

Значна зміна характеристик теплообміну відбувається при утворенні на поверхні відкладень. Вплив доданків ПАР на процес утворення накипудосліджувалось в [61] для випадку нагріву високомінералізованої пластової води з сумою солей близько 9 %. Ця вода утримує значну кількість сульфату кальцію у порівнянні з розчинністю його в чистій воді, що підсилює процес накипоутворення при збільшенні температури. В якості доданків ПАР використовувались алкіл бензол-сульфанат натрія (Азолят Б) і нейтралізований чорний контакт" (НЦК),отриманий в вигляді розчину солей сульфокислот при обробці кислого гідрона" лугами. Характерні залежності утворення накипу від концентрації ПАР і часу нагріву високомінералізованої пластової води наведено на рисунку 3.6

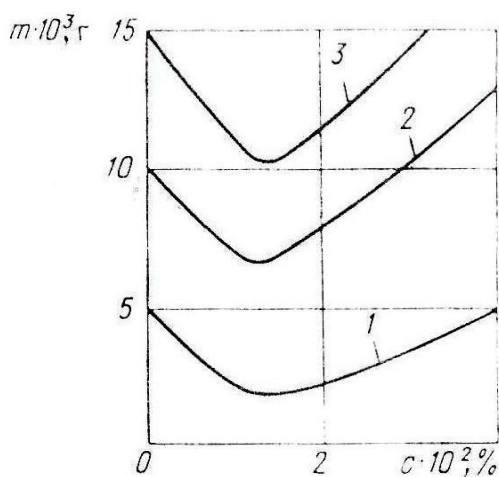


Рисунок 3.6 - Утворення накипу при нагріванні високомінералізованої води з добавками поверхневоактивних речовин.

Відомо, що ПАР мають миючі властивості [62,63]. Очищення поверхностей нагріву, очевидно, повинно позначатися при додаванні ПАР і на інтенсивності теплообміну. Вплив ОДА на теплообмін (нагрівання води) при чистих і забруднених поверхнях досліджено в [64]. У випадку чистої поверхні (рисунок 3.7, крива 1) при

малих концентраціях ОДА (в якості ПАР використовувався октадециламін, скорочено ОДА)присутність добавок не впливає на інтенсивність теплообміну. Однак з деякого $c \approx 20$ мг/л коефіцієнт теплопередачі знижується. Мабуть, це пов'язано з низкою обставин. Згідно з викладеним вище при підвищених концентраціях ПАР слід очікувати зниження гідродинамічного опору та інтенсивності теплообміну.

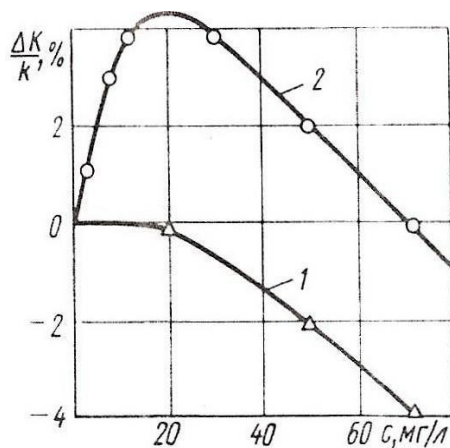


Рисунок 3.7 - Вплив доданків октадициламіну на зміну відносного коефіцієнта теплопередачі при нагріві води в теплообміннику на чистій 1 і забрудненій 2 поверхні

Аналізуючи характеристики зміни в'язкості води в залежності від концентрації ОДА, можна побачити, що до $c = 20$ мг/л в'язкість води практично не змінюється. Починаючи з $c = 20$ мг/л і вище в'язкість води інтенсивно зростає, що у свою чергу також веде до зниження тепловіддачі, в однофазної рідині. У випадку забрудненої поверхні на початковому етапі при відносно невеликих концентраціях ОДА коефіцієнт теплопередачі зростає.

Молекули ПАР (ОДА), абсорбуючись на поверхні твердих відкладень або металу, утворюють добре гадратований адсорбційний шар, що обумовлює виникнення "розклинювального" тиску. Це сприяє відриву частинок відкладень від поверхні теплообміну і переходу їх в рідину. Адсорбційні плівки на поверхні частинок відкладень надають цим часткам високу агрегативну стійкість, емульгуючу здатність і загальмовують процес їх прилипання в іншому місці. Подальше підвищення концентрації ОДА призводить до того, що зростання в'язкості і відповідне зниження α починають превалювати над тепловіддачею, починає падати. Приріст k для забруднених поверхонь не тільки є функцією концентрації, але і залежить від часу впливу і ступеня забрудненості поверхонь нагрівання.

3.4 Висновки до розділу 3

1 Відкладення, які накопичуються на теплообмінних поверхнях у процесі експлуатації систем тепlopостачання, є причиною зниження ефективності систем тепlopостачання у сучасних умовах, яке обумовлене перевитратою палива, збільшенням витрат на транспортування теплоносія, зниженням надійності роботи обладнання, погіршенням екологічної ситуації.

2 Методи ведення водно-хімічного режиму систем тепlopостачання багатостадійні, в основному, направлені на приведення показників якості теплоносія до нормованого рівня і характеризуються з одного боку низькою ефективністю, а з іншого – високою експлуатаційною вартістю.

3 Для комплексної технології ведення водно-хімічного режиму систем тепlopостачання доцільним є модифікування теплоносія плівкоутворюючими поверхнево-активними речовинами, зокрема амінами.

4 Одним з важливих ефектів використання ПАР у потоці рідини є ефект Томса, який проявляється у значному зниженні гідродинамічного опору (до 80%).

5 Суттєвий вплив на гідродинаміку і теплообмін має величина молекулярної маси поверхнево-активної речовини M_g : із зростанням молекулярної маси добавки ПАР ефект зниження теплообміну та гідравлічного опору зростає.

6 На сьогодні технічні рішення та наукове обґрунтування процесів, які відбуваються при використанні плівкоутворюючих низькомолекулярних поверхнево-активних речовин у системах тепlopостачання з водогрійними котлами недостатньо розвинені.

7 Для роботи теплоенергетичного обладнання основними критеріями вибору поверхнево-активних речовин є: суттєве зниження поверхневого натягу (на 40-50%); значна адсорбція на рідких та твердих поверхнях; інгібування корозійних процесів; відсутність піноутворення; термостійкість; низька ступінь деструкції; мінімальна токсичність та біологічний розклад; відсутність галогенідів і з'єднань сірки; негорючість; наявність надійного джерела отримання ПАР; його невисока вартість.

4 ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ У МОДИФІКОВАНОМУ ТРИЕТАНОЛАМІНОВИМ ЕФІРОМ ЖИРНИХ КИСЛОТ ТЕПЛОНОСІЇ.

Триетаноаліновий ефір жирних кислот являє собою суміш гліцерину, моно-, дигліцеридів, калієвих мил, що при змішуванні з водою утворює стабільні емульсії. ТЕАЕЖК вироблений згідно ТУ У 23.2-30908997-002:2007. Перелік сировини, що використовується під час виробництва ТЕАЕЖК, наведений у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Перелік сировини, що використовується для виробництва

Назва речовини	Нормативний документ
1 Олія соняшникова	ГОСТ 1129-93
2 Олія лляна	ГОСТ 5791-81
3 Олія ріпакова	ГОСТ 8988-77
4 Спирт етиловий ректифікований технічний	ГОСТ 18300-87
5 Калію гідроксид	ГОСТ 24363-80

4.1 Моделювання процесу теплообміну на поверхні нагріву

Під час роботи систем тепlopостачання при використанні жорсткої води на поверхні труб утворюються відкладення, які мають високі механічні властивості і низький коефіцієнт теплопровідності. Відкладення викликають перегрів труб, що призводить до скорочення терміну їх експлуатації. Процес нашарування відкладень є функцією часу, що починається з нуля і має далі лінійну залежність [65]. Зазвичай при розрахунку теплового стану труб термічний опір відкладень приймається сталим (найчастіше приймається нулю), при цьому не береться до уваги той факт, що у початковий період часу поверхні чисті і працюють в умовах, що різко відрізняються від умов кінцевого періоду експлуатації. Для визначення терміну експлуатації труб важливо вміти оцінювати їх тепловий стан з урахуванням товщини шару і стану відкладень [66].

Як відомо для визначення теплопровідності через багат шарову плоску стінку використовується (4.1)

$$\lambda_{екв} \equiv \frac{\delta_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (4.1)$$

Слід відмітити, що для силікатних відкладень із вмістом кремнекислих з'єднань 20% величина теплопровідності становить не менше 0,25-0,5 Вт/(м·К)); для сульфатних (гіпсових) відкладень із вмістом гіпсу CaSO_4 більше 50% коефіцієнт теплопровідності приймається у межах 0,5 -2,5 Вт/(м·К)); для відкладень, які складаються із оксидів заліза ця величина становить 4,6 – 5,7 Вт/(м·К)); для карбонатних відкладень із вмістом CaCO_3 і MgCO_3 до 70% аморфного типу.

На рисунку 4.1 показана залежність еквівалентної теплопровідності труби від товщини шару і величини коефіцієнту теплопровідності різних типів відкладень.

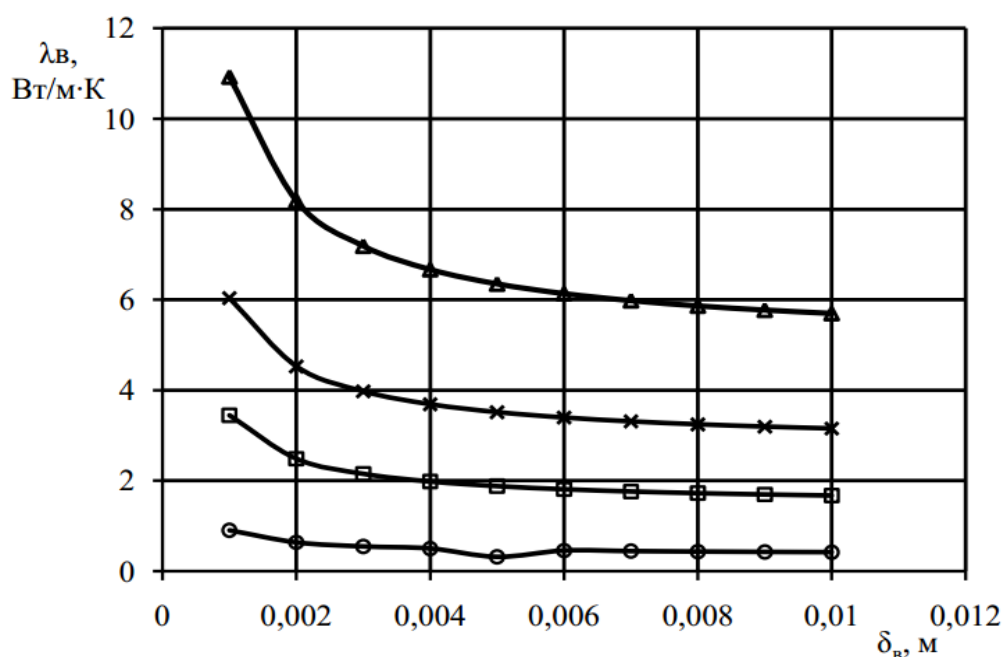


Рисунок 4.1 - Залежність коефіцієнту еквівалентної теплопровідності від товщини шару відкладень і їх типу: (×)карбонатні, із вмістом CaCO_3 і MgCO_3 до 70% аморфного типу; (□) сульфатні (гіпсові), із вмістом гіпсу CaSO_4 більше 50%; (Δ) залізооксидні; (о) силікатні, із вмістом кремнекислих з'єднань 20%

З рисунку видно, що зі збільшенням товщини шару відкладень величина коефіцієнту еквівалентної теплопровідності зменшується. Відповідно термічний опір теплопередачі $R=1/k$ для різних видів відкладень зростає у порівнянні з металом. Тепловий потік, що сприймається трубами, практично не залежить від температури їх зовнішніх поверхонь і визначається в основному конструкцією, умовами контактування фаз та іншими факторами, що не залежать від стану внутрішніх поверхонь. Таким чином,

тепловий потік, що сприймається трубами буде майже однаковим як для чистої труби, так і для труби, що вкрита шаром відкладень. Тому і кількість теплоти, яка передається через поверхню труб, в обох випадках буде однаковим. Зміниться тільки величина температурного напору. Для чистої труби ця величина буде суттєво менше чим для труби, вкритої відкладеннями

Густина теплового потоку q в залежності від коефіцієнту теплопровідності $\lambda_{екв}$ і температурного напору Δt між зовнішньою і внутрішньою поверхнями труби з відкладеннями може бути визначена за формулою (4.2)

$$q = \frac{\lambda_{екв}}{\delta_{\Sigma}} (t_1 - t_{n+1}) \quad (4.2)$$

Поверхня труби з шаром відкладень розглядається як багат шарова стінка що складається з трьох шарів: стінка металу труби, шар відкладень, ламінарний прошарок (рисунок 4.2).

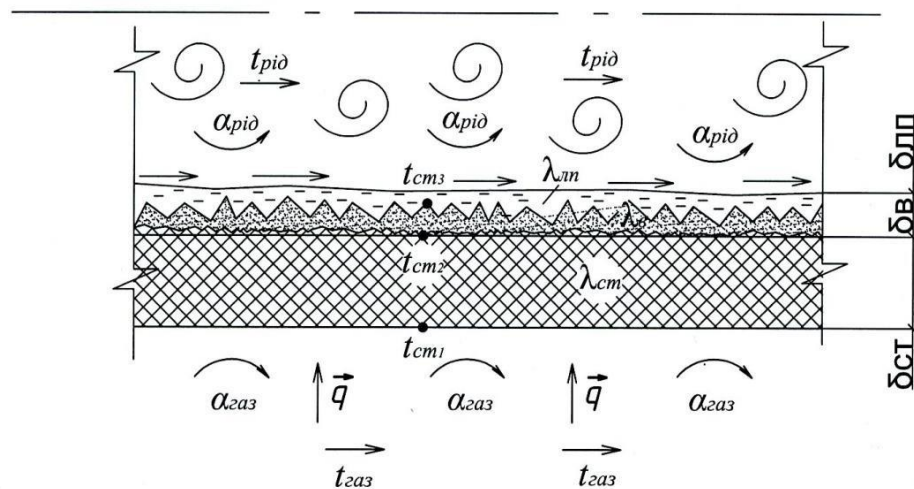


Рисунок 4.2 - Теплопередача через стінку з шаром відкладень

Їх товщини відповідно $\delta_{ст}$, $\delta_{від}$, $\delta_{лп}$, а коефіцієнти теплопровідності $\lambda_{ст}$, $\lambda_{від}$,

$\lambda_{лп}$. Тоді коефіцієнт теплопередачі (Вт/м·К) через плоску стінку для труб з шаром відкладеннями визначається за формулою (4.3)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{pid}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{від}}{\lambda_{від}} + \frac{\delta_{лп}}{\lambda_{лп}} + \frac{1}{\alpha_{gaz}}} \quad (4.3)$$

де $\alpha_{газ}, \alpha_{pid}$ - коефіцієнти тепловіддачі середовищ до зовнішньої та внутрішньої поверхні нагріву, (Вт/м² К)

d_1, d_2 внутрішній та зовнішній діаметр труби, м;

$\delta_{cm}, \delta_{vid}, \delta_{ln}$ товщини стінки металу, шару відкладень та ламінарного під шару в ідповідно, м;

$\lambda_{cm}, \lambda_{vid}, \lambda_{ln}$ - теплопровідність матеріалу стінки, відкладень та ламінарного підшару, Вт/(м·К).

Очищення поверхні від відкладень та утворення адсорбційної захисної плівки по відношенню до агресивних компонентів впливає на процес теплопередачі. Поверхня труби із захисною плівкою також розглядається як багатошарова стінка, що складається з трьох шарів: стінка металу труби, шар-плівка з молекул адсорбованої поверхнево-активної речовини, ламінарний прошарок, що стає тоншим за рахунок зменшення шоркості труби внаслідок формування адсорбційних шарів (рисунк 4.3).

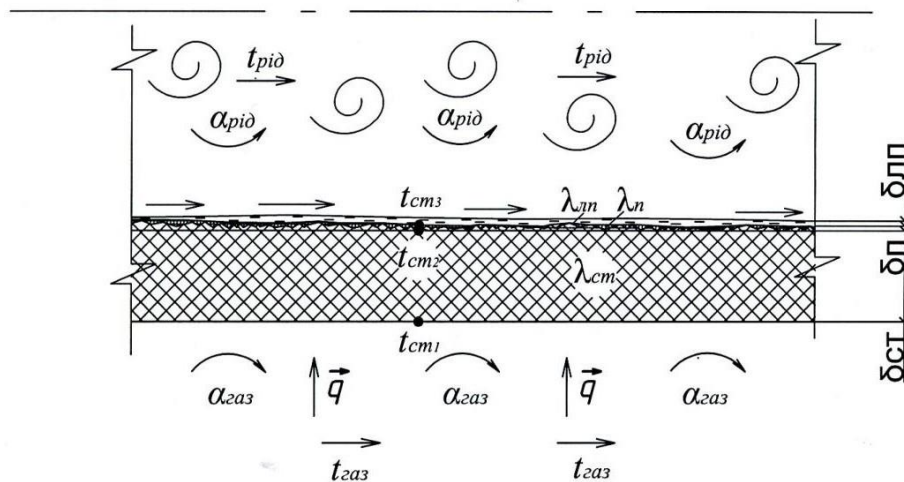


Рисунок 4.3 - Теплопередачі через стінку, вкриту захисною плівкою

Тоді коефіцієнт теплопередачі (Вт/м²К) через плоску стінку для труб з шаром-плівкою ПАР визначається за формулою (4.4)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{pid}} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{ln}}{\lambda_{ln}} + \frac{1}{\alpha_{газ}}} \quad (4.4)$$

де δ_n товщина захисної плівки, м,

λ_n . теплопровідність, Вт/м К.

Таким чином тепловий потік, що передається через стінку теплопровідністю має наближатися до величини теплового потоку, що передається конвекцією до теплоносія $Q_{mn} \sim Q_k$. Нев'язкою балансу буде термічний опір плівки R_n .

Рівняння балансу густини теплового потоку для очищеної поверхні буде мати вигляд (4.5)

$$q = -\lambda \frac{dt}{dn} \alpha(t_{cm} - t_p) \quad (4.5)$$

4.2 Механізм руйнування відкладень на теплообмінних поверхнях у присутності адсорбційного середовища

Для руйнування твердого тіла і отримання нової поверхні, необхідно подолати когезійні сили і сили, які обумовлюють цілісність твердого тіла. При диспергуванні (руйнуванні поверхні) під дією зовнішніх сил конденсована речовина спочатку піддається об'ємному деформуванню (пружне і пластинчасте) і тільки після того при певному механічному зусиллі тіло руйнується. Таким чином, роботу, необхідну для диспергування, можна розділити на дві складові, одна з яких йде на об'ємне деформування тіла, а інша – на утворення нових поверхонь.

Робота пружного і пластичного деформування пропорційна об'єму тіла формула (4.6)

$$W_{def} = kV \quad (4.6)$$

де k - коефіцієнт пропорційності, рівний роботі об'ємного деформування одиниці об'єму конденсованого тіла;

V - об'єм тіла, м³.

Робота утворення нової поверхні при диспергуванні пропорційна приросту поверхні формула (4.7)

$$W_n = \sigma \Delta S \quad (4.7)$$

де σ - енергія утворення одиниці поверхні або поверхневий натяг, Н/м;

ΔS - приріст поверхні або площа утвореної поверхні, м².

Повна робота, затрачена на диспергування, виражається рівнянням Ребіндера формула (4.8)

$$W = W_n + W_{def} = \sigma \Delta S + kV \quad (4.8)$$

При великих розмірах тіла можна знехтувати роботою утворення поверхні, тобто повна робота диспергування визначається головним чином роботою пружного і пластинчатого деформування.

При дробленні матеріали руйнуються у першу чергу у місцях дефектів міцності (макро- і мікротріщини – дефекти у кристалічній решітці). П.А. Ребіндером було встановлено явище пониження опору твердих тіл пружним і пластинчатим деформаціям, і як наслідок руйнування тіл під дією адсорбції ПАР із зовнішнього середовища. Це явище отримало назву *ефекту Ребіндера* – адсорбційного пониження міцності твердих тіл. Механізм його полягає у полегшенні розвитку мікрощілин внаслідок зменшення поверхневої енергії за допомогою поверхнево-активних речовин в результаті чого відбувається деформування і руйнування твердого тіла [67].

Вченим встановлено, що чуттєві до адсорбції тільки ті мікрощілини, устя яких виходять на зовнішню поверхню кристалу, а «тупикові» частини, залишаються всередині тіла. Такі щілини завжди мають клиноподібні вирізи і виникають при будь-якому об'ємно напруженому стані тіла, коли на одиницю площі діють крім розтягувальних ще і тангенціальні напруження.

Розвитку таких щілин сприяють розтягнення і навпаки перешкоджають стиснення: при всебічному стисненні розвиток мікрощілин взагалі зупиняється. У системах теплопостачання такими розтягненнями слугують температурні розширення внаслідок зміни температури теплоносія і зовнішнього повітря на протязі опалювального сезону.

Адсорбція Γ молекул ПАР викликає зниження поверхневого натягу δ на поверхні відкладень на величину $\delta_0 - \delta_2$. Дія адсорбційних шарів обумовлена їх переміщенням по поверхні від устя мікрощілини до перешкоди, яка обмежена розмірами адсорбованої молекули і відповідно критичною товщиною зазору у мікрощілині. В цьому критичному зазорі межа адсорбційного шару $\beta\beta_1$ утворює лінійний бар'єр, на кожену одиницю довжини якого діє тиск $\delta_0 - \delta_2$ у бік його подальшого просування у глибину мікрощілини (рисунок 4.4) і наростанню деформації. Ефект цього тиску еквівалентний збільшенню зовнішнього зусилля F на величину ΔF , тобто $\Delta F \sim \delta_0 - \delta_2$, замінюючи собою дію адсорбційних шарів і слугуючи їх механічним еквівалентом.

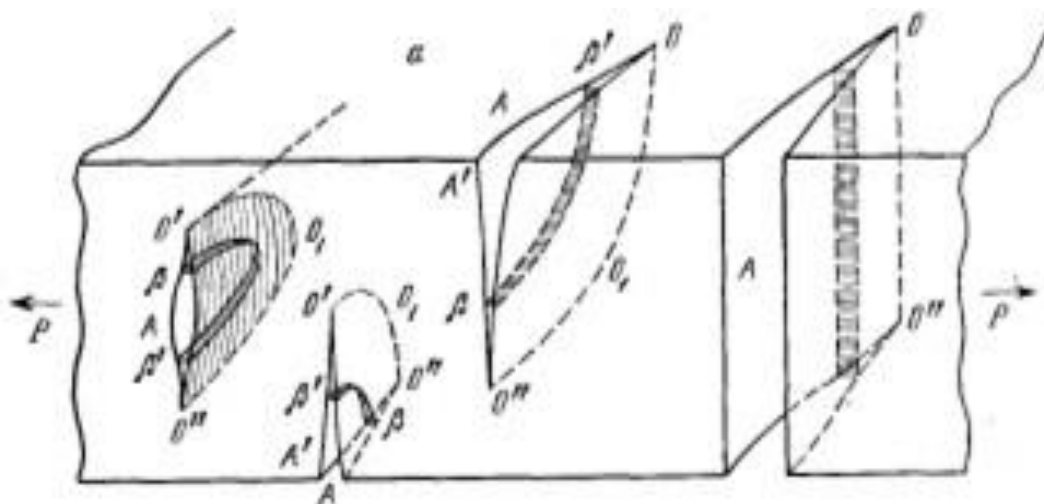


Рисунок 4.4 - Дефект структури поверхні (тріщини)

При абсорбції із модифікованого теплоносія рідина проникає в устя мікротріщини під впливом капілярного тиску. При цьому з меніска краплі виділяються молекули найбільш поверхнево-активного компонента, що мігрують вперед і покривають поверхні щілини зі значно більшою швидкістю ніж всмоктування рідини загалом через в'язкий опір. У частині мікротріщин, заповненій рідиною, тонка плівка рідини може спричиняти додатковий тиск. Існування такого тиску було встановлено у дослідях Б.В. Дерягіна і його співробітників.

Крім полегшення розвитку кожної окремої мікрощілини в результаті проникнення в неї адсорбційних шарів ПАР, ефект адсорбційного полегшення міцності обумовлений також і збільшенням кількості мікрощілин, які розвиваються в одиниці об'єму деформованого тіла (теплонпруженої поверхні). Поступове змикання мікрощілин від лінії «тупиків» $O'O'O''$ до устя AA' під впливом сил зчеплення у твердому тілі аналогічне процесу зливання двох крапель рідини від дією поверхневого натягу. Поблизу тупику мікрощілини мають зародкову частину, у якій сили зчеплення нарастають до нормальної найбільшої величини, що відповідає перетворення зазору в нуль, тобто переходу до нормальної структури тіла у самому тупику.

Відповідно поверхнева енергія швидко зростає зі збільшенням ширини зазору у щілині від тупика до устя у напрямку осі x до нормального найбільшого значення δ_0 , що відповідає вільній зовнішній поверхні тіла (рисунк.4.5).

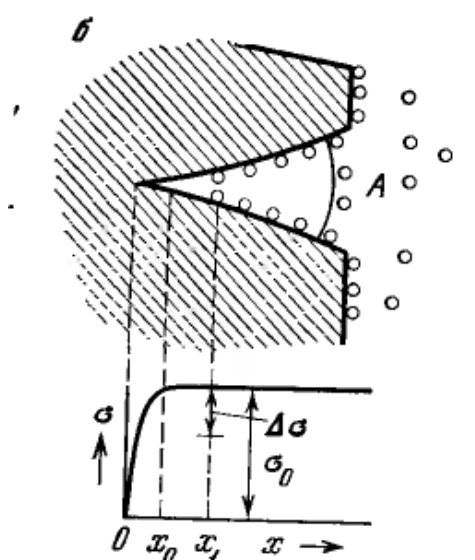


Рисунок 4.5 - Клиновидна мікрощілина

Змикання мікрощілин після зняття навантаження повинно відбуватись і при пластичних деформаціях з тією різницею, що після зсуву змикання відбувається у новому місці. Досягнення межі міцності, тобто розрив, відповідає повному розвитку однієї з мікрощілин, яка пересікає весь поперечний переріз зразка. При цьому відбувається миттєве зняття навантаження частин тіла по обидва боки розриву, всі решта щілин змикаються, а їх поверхнева енергія після розриву розсіюється у вигляді теплоти.

У клиновидних, реальних, щілинах, устя яких виходить на зовнішню вільну поверхню твердого тіла, молекули ПАР вільно потрапляють в устя і досягнувши точки, де власні розміри перешкоджають подальшому проникненню, утворюють таким чином «межу адсорбуючого шару». Вздовж цієї межі $\beta\beta_1$ молекули повинні створювати тиск, який прагне далі роздвинути тріщину і по своїй величині пропорційний пониженню поверхневого натягу. Описана дія у мікрощілині аналогічна дії двовимірного тиску мономолекулярного шару органічних ПАР на поверхні чистої води у дослідях Ленгмюра. У нас роль бар'єра відіграє критична ширина зазору у клиновидній щілині, приблизно рівній подвійному діаметру молекул адсорбента.

Випадки взаємодії твердого тіла з адсорбованими речовинами поділено на дві групи.

- 1) $A > C$
- 2) $A < C$.

C – робота сил зчеплення у кристалі, енергія зв'язку частинок твердого тіла;
 A – робота адсорбційних сил, енергії зв'язку її молекул з поверхнею тіла;

E – робота зовнішніх сил при деформації тіла у розрахунку на дану мікрощілину.

Тоді можливі два випадки:

У першому випадку сили адсорбції перевищують сили зчеплення у твердому тілі хоча б на деяких ділянках, що відповідає явищу набухання і колоїдного розчинення порівняно м'яких і неоднорідних по структурі і складу тіл.

Що стосується другого випадку – істинного твердих тіл, для яких сили зчеплення у тілі перевищують сили адсорбції. У цьому випадку проникнення молекул ПАР у недеформоване тіло не буде, що і було підтверджено у дослідях з кристалами кальциту, слюди і металів. Однак було показано, що проникнення навіть великих молекул поверхнево-активних органічних речовин може відбуватися в устя мікрощілин при деформуванні, коли робота деформації E разом з роботою адсорбційних сил A перевищує енергію зчеплення.

$$A + E > C, \text{ тобто при умовах, що } E > C - A.$$

Тобто при зменшенні навантаження тіла знову $A < C$, що відповідає самовільному змиканню щілин, починаючи з тупика – зародкового кінця щілини, з витісненням адсорбційних шарів, подібно до того як переміщенням бар'єру Ленгмюра по поверхні води можна очищати її від мономолекулярного шару. У нашому випадку роль роботи зовнішніх сил, прикладених до бар'єру, відіграє робота сил зчеплення із зародковою частиною тріщини. Адсорбційні шари, які потрапили у мікрощілини, у процесах деформації сповільнюють змикання мікрощілин або поступове зникнення пружної деформації після зняття навантаження.

4.3 Утворення гідрофобної плівки на твердій поверхні

У роботах Ребіндера П.А. [68] було встановлено, що стійкість гідрофобізованої поверхні по відношенню до процесу відмивання водою досягається при незворотній адсорбції речовин, які фіксуються в адсорбційному шарі, вступаючи своїми полярними групами у хімічну взаємодію з оксидною плівкою поверхні металу. Гідрофобні шари утворюються речовинами, молекули яких мають досить довгий вуглеводневий ланцюг, наприклад ПАР. При утворенні адсорбційного шару полярні групи хімічно зв'язуються з поверхневими атомами металу. Вуглеводнева частина молекули орієнтується у навколишнє середовище, при цьому утворюється гідрофобна парафіноподібна зовнішня обкладинка, що не змочується водою, міцно зв'язана з металом шаром нерозчинного

поверхневого з'єднання. Мінімальна кількість речовини, необхідна для утворення насиченого мономолекулярного шару, може бути розраховано за формулою (4.9)

$$X = \frac{SM}{S_m N} \quad (4.9)$$

де S - поверхня конденсатора, м²;

S_m - мінімальна площа 1 молекули у насиченому шарі, м²;

M - молекулярна маса, а.о.м. ;

N - число Авогадро.

Ці уявлення в області стійкості гідрофобізації поверхонь металу підтверджуються роботами Адамса, Гнама, Дрю, Негл [71].

Ступінь гідрофобності характеризуються краєвим кутом змочування і величиною Z , причому $Z = 1 - \cos \theta = 1 - B$, при $B = -1$ і $Z = 2$ поверхня буде гідрофобною, при $B = 2$ і $Z = 0$ поверхня буде гідрофільною. Краєвий кут змочування визначається проектуванням профілю каплі.

Адсорбція молекул амінів на поверхні металу протікає за складним механізмом:

- 1) фізичної адсорбції - під дією електростатичних сил молекули розміщуються перпендикулярно поверхні вуглеводневим радикалом до водного середовища;
- 2) хімічної адсорбції - зовнішні електрони атому азоту вступають у взаємодію з атомом металу, утворюючи міцний ковалентний зв'язок.

Створений з молекул амінів адсорбційний шар блокує анодний активний центр розчинення металу і, таким чином, запобігає дифузії і сорбції корозійно-агресивних компонентів та утворенню центрів кристалізації на поверхні.

Адсорбційні шари відіграють велику роль у дослідженні гетерогенних систем: якщо молекули, які скупчуються біля поверхні розділу фаз, приймають участь у хімічній реакції, то збільшення їх концентрації у поверхневому шарі, а також орієнтація адсорбованих полярних (дипольних) молекул викликають у багатьох випадках підвищення швидкості реакції.

Коли ПАР у реакцію не вступає, утворений ним адсорбований шар – плівка, повинен запобігати проходженню реагуючих з твердим тілом речовин ззовні до його верхні або проникненню іонів або молекул твердого тіла через поверхню у навколишнє

середовище. Таким чином, присутність у системі ПАР повинно уповільнювати гетерогенні реакції, наприклад кристалізацію чи розчинення твердого тіла у оточуючій рідині, випаровування і взагалі реакцію твердого тіла з зовнішнім середовищем. Швидкість всіх цих гетерогенних процесів пропорційна діючій поверхні розділу і виражається кінематичним рівнянням (4.10) Нойєнса і Уїтнея

$$\frac{dm}{d\tau} = V = kS(x_{\infty} - x) \quad (4.10)$$

де dm – кількість речовини, яка перейшла у навколишнє середовище за час $d\tau$, м^3 ;

S – поверхня розділу обох фаз; $(x_{\infty} - x)$ – різниця концентрацій (граничної, тобто зрівноваженої з твердою фазою, віданої) речовини у розчині, м^2 ;

k – константа швидкості реакції, моль;

V – швидкість реакції у даний момент, моль/л/с.

$$k = \frac{D}{\delta} \quad (4.11)$$

де D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;

σ – товщина дифузійного шару, м.

А в роботі [69] з'ясовувалась та вивчалась уповільнююча дія ПАР на процеси розчинення металів (цинк, залізо та мідь) та кристалічних граней кристалів кальциту CaCO_3 у водних розчинах кислот (H_2SO_4 , HCl). Було виявлено у всіх досліджених випадках різке вираження ефекту, пасиватори (ПАР) діють негативно каталітично. Явище отримало назву адсорбційне пасивування поверхні. Особливо сильною дія виявилася у жирних і ароматичних кислот, фенолів, при цьому досліджувалися речовини кислого характеру, які не змінювали своєї поверхневої активності і іонного стану у присутності сильних кислот. Ці речовини у дуже малих концентраціях ($c = 0,001 - 0,01$ моль/л) спричиняють пасивуючу дію, знижуючи швидкість процесу у 3-4 рази, а в деяких випадках і до 0. Встановлено, що швидкість гетерогенних процесів залежить від концентрації, особливо різко діє перше додавання пасиватору. При насиченні шару дія наступного додавання ПАР незначна, при цьому найменша швидкість процесу V_{∞} досягається при концентрації ПАР, яка відповідає насиченому і орієнтованому шару його молекул на твердій поверхні розділу.

Можна прийняти, що насичений адсорбційний шар орієнтованих диполів пасиватора біля твердої поверхні (при $\Gamma = \Gamma_{\infty}$) має деякий коефіцієнт проникності H .

Коефіцієнт H показує, на скільки зменшується діюча поверхня розділу S у випадку насиченого адсорбційного шару S_{∞} у порівнянні з тим, якби адсорбційного шару не було зовсім і вся поверхня була б вільна ($c=0$, $\Gamma=0$, $S=S_0$).

$$S = HS_{\infty} \cdot H = \frac{S_{\infty}}{S} \quad (4.12)$$

При концентрації пасиватора c у розчині його адсорбція рівна Γ і частина поверхні $\frac{\Gamma}{\Gamma_{\infty}}$ вкрита адсорбованими молекулами, тобто він може розглядатись як насичений адсорбційний шар. Інша частина $\left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_{\infty}}\right)$ не вкрита, тобто є вільною від пасиватора. З рівняння (4.12) отримуємо

$$\frac{dm}{d\tau} = V = k \cdot S \quad (4.13)$$

Ще з початку XX століття західноєвропейськими та американськими патентами описувалося застосування фенолів, нафтових і сульфокислот для захисту заліза при очистці його від продуктів корозії. Вони запобігали розчиненню металів у кислотах. Їх додавали до розчинів кислот при очистки поверхонь металів від оксидів (заліза від іржі). При цьому кислота реагувала тільки з оксидом, розчиняючи його, метал захищався від руйнації доданими реагентом. Всі ці речовини відносилися до класу поверхнево-активних. Теоретичного пояснення та фізико-хімічного дослідження адсорбційної природи цього явища до 30-х років не проводилось.

Виявлено [70], що пасивування металів, з одного боку, і гідрофільних кристалічних граней кальциту, з іншого, мають абсолютно різну природу. Пасивування металів носить чисто адсорбційний характер і не залежить від швидкості перемішування оточуючого розчину навіть при сильному перемішуванні. Пасивування кальциту припиняється при сильному перемішуванні рідини, і швидкість розчинення кальциту спадає майже повністю з додаванням ПАР, які дуже сповільнюють процес при відсутності перемішування. Встановлено, що поверхня кальциту покривається при розчиненні у кислоті шаром пухирців вуглекислого газу. При відсутності ПАР ці пухирці через повне змочування поверхні кристалу водним розчином кислоти легко відстають від неї і поверхня звільняється. У присутності ПАР змочуваність кристалу водним розчином, як показали роботи Тайбмана А.Б., Мамуля Я.В., Ребіндера П.А. знижується. Краєвий кут θ , якій

дорівнював 0, зростає і утворені на поверхні грані пухирці газу щільно прилягають до неї, покриваючи метал газовою плівкою і тим самим зменшуючи його діючу поверхню. При малих розмірах кристалів кальциту і ПАР, сильно діючих на змочування, пухирці газу, які прилипли до поверхні кристалу, можуть підняти його на поверхню рідини, так що буде відбуватись флотація твердих кристаликів пухирцями газу. Подібне явище не спостерігається при пасивуванні гідрофобних поверхонь металу.

4.4 Висновки до розділу 4

1 Руйнівна (очисна) дія модифікатора пояснюється фізичним явищем – ефектом Ребіндера - адсорбційним пониженням міцності (АПМ) твердих матеріалів під дією поверхнево-активного середовища. Для розрахунку та прогнозування руйнування необхідно знати міцність відкладень та мати дані про величину поверхневої енергії.

2 Утворення захисної плівки на поверхні металу є стадійним адсорбційним процесом, який складається з фізичної та хімічної адсорбції.

3 Необхідно провести експериментальні дослідження кінетики накопичення та руйнування відкладень, оцінити ступінь корозійного захисту у водних розчинах триетаноламінового ефіру жирних кислот.

4 Триетаноламіновий ефір жирних кислот відноситься до низькомолекулярних плівкоутворюючих поверхнево-активних речовин, є мало шкідливою речовиною (4 клас небезпеки за ГОСТ 12.1.007).

5 Під час руйнування відкладень у теплоносії переходять тверда фаза з поверхні відкладень, що складається і з оксидів заліза та міді. Це призводить до зашламлювання теплоносія, послаблення теплообміну і інтенсифікації електрохімічної корозії. Для того щоб уникнути подібних наслідків контактування відкладень з ПАР, необхідно використовувати шламовідокремлювачі з вставками з природних магнітів. Необхідно встановити вплив магнітного поля на тепломасообмінні процеси у системі теплопостачання при модифікації теплоносія.

5 ПОБУДОВА МОДЕЛІ ТА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Конструкція пластин в теплообмінниках така, що кожна прокладка щільно зафіксована в спеціальному каналі між двома пластинами. Прокладка може бути зафіксована на поверхні пластини двома способами: приклеюванням або фіксацією кліпсами. Приклеєна прокладка добре тримається на поверхні пластини, що дозволяє виконувати регулярну збирання-розбирання теплообмінників, механічне чищення без зняття і регулярної заміни прокладок. Кліпсова фіксація частіше застосовується в харчовій промисловості.

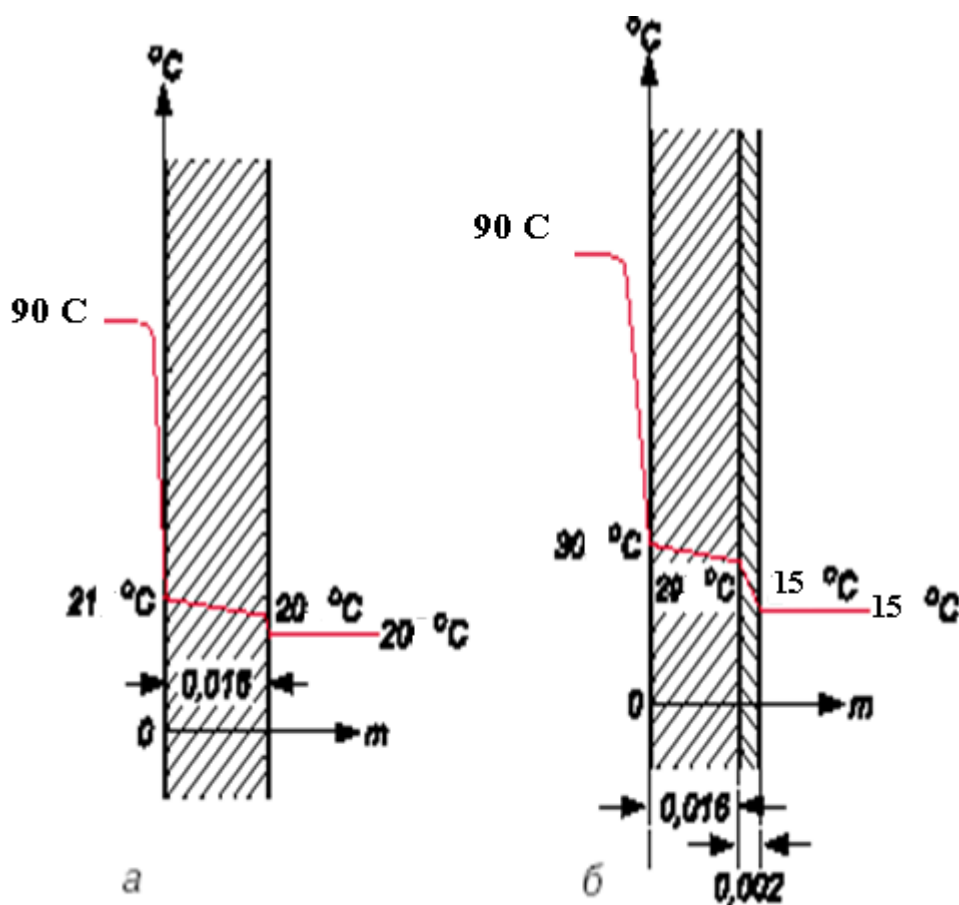


Рисунок 5.1 - Схема процесу теплопередачів пластинах: а) без накипу ,
б) з накипом

Сукупний вплив товщини шару накипу і її теплопровідності виражається комплексом, відомий як «термічний опір». Зі збільшенням товщини шару δ і зменшенням

його теплопровідності λ термічний опір зростає. Це призводить до підвищення температури димових газів t_d і зростання втрат теплоти із відхідними газами.

Дослідження були проведені на спрощеній моделі пакета пластин кожухопластинчатого теплообмінного апарату, пластини омивався тепло носієм , водою

Температура теплоносія – 90 °С;

Швидкість теплоносія -1.3 м/с;

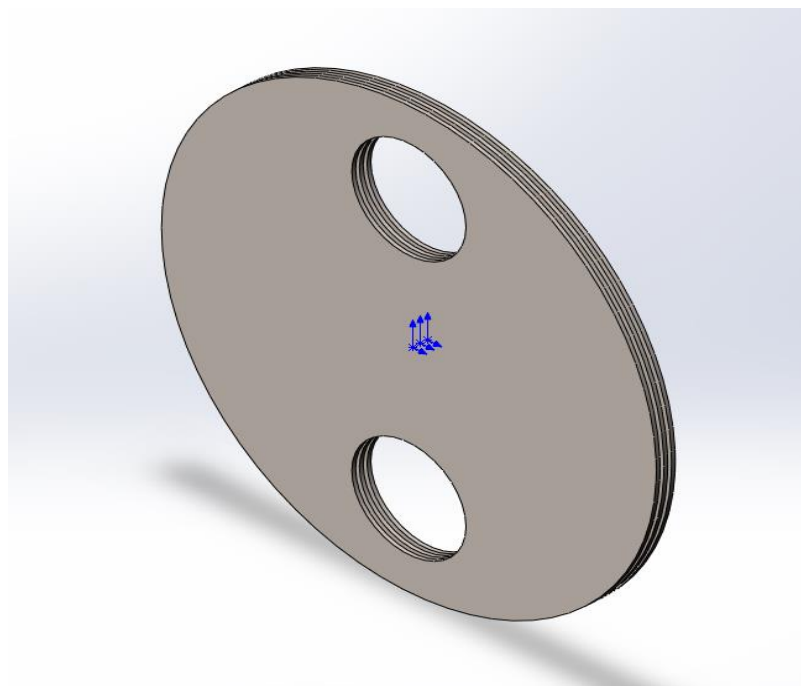


Рисунок 5.2 – Спрощений пакет пластин кожухопластинчатого теплообмінного апарату

Технічна характеристика пластин $f = 0,3 \text{ м}^2$:

- поперечний переріз каналу $S = 11 \text{ м}^2$;
- приведена довжина каналу $L_n = 1,12 \text{ м}$;
- товщина 1 мм;
- маса пластини 3,2 кг.

При проведенні фізичних експериментів дуже важливою і складною є проблема доказу правильності проведення конкретного експерименту.

5.1 Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі пакета пластин без модифікації теплоносія ПАВ

Розглянемо процес плівкової конденсації перегрітої пари на зовнішній поверхні пластин. Необхідно визначити режим стікання конденсатної плівки. Розрахуємо комплекс Z .

$$Z = \frac{Ga^{1/3}}{K \cdot Pr} \quad (5.1)$$

де K – критерій фазового переходу;

Ga – критерій Галіллея

Pr – критерій Прандтля.

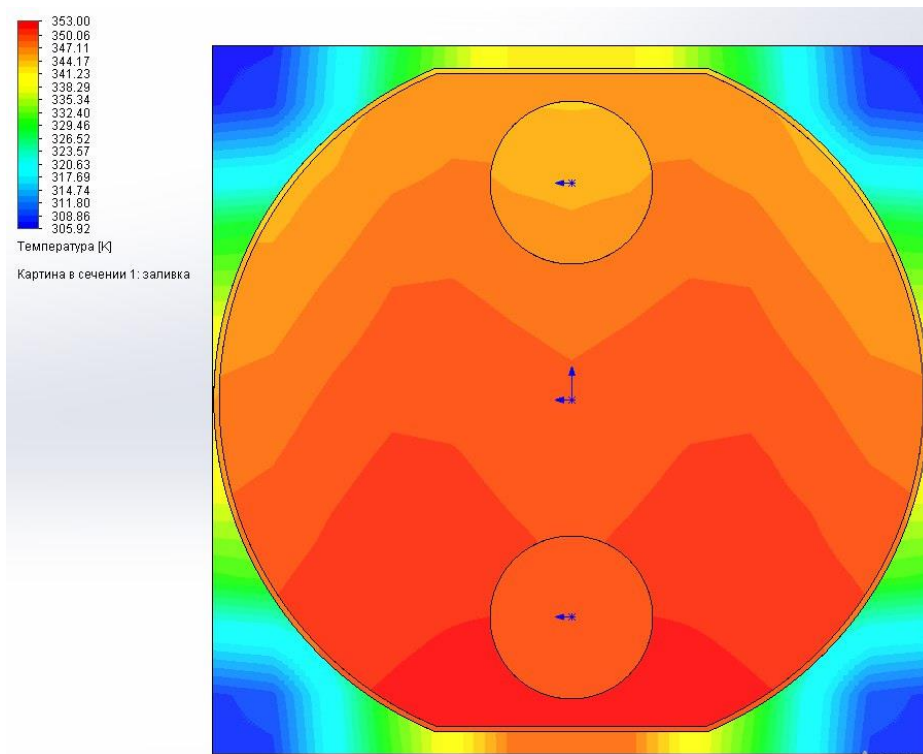


Рисунок 5.3 - Розподіл температур по пластині (площина 1).

Визначасмо:

$$r_{\text{пер}} = r_1 + r' = r_1 + (h_{2i} - h''_{\text{снп}}) \quad (5.2)$$

$$r_{\text{пер}} = 2174,3 + (2750 - 2720) = 2204,3 \text{ кДж/кг}$$

Розрахуємо критерій фазового переходу:

$$K = \frac{r_{\text{пер}}}{C_{p1}(t_H - t_{c1})}, \quad (5.3)$$

$$K = \frac{2204,3 \cdot 10^3}{2,257 \cdot 10^3 (90 - 65)} = 90,3, \quad (5.4)$$

Розрахуємо критерій Галіллея:

$$Ga = \frac{g \cdot l_0^3}{\nu_1^2}, \quad (5.5)$$

Розрахуємо комплекс Z :

$$Z = \frac{(1,7 \cdot 10^{16})^{1/3}}{90,3 \cdot 1,3} = 6677. \quad (5.6)$$

Так як отримане значення Z більше за $Z_{кр} = 2300$, то звідси випливає, що режим стікання конденсатної плівки являється змішаним. Число Рейнольдса у такому випадку розраховується по наступному емпіричному рівнянню:

$$Re = \left[89 + 0,024 \cdot Pr^{0,5} \left(\frac{Pr}{Pr_C} \right)^{0,25} \cdot (Z - 2300) \right]^{4/3}; \quad (5.7)$$

По температурі $t_{cl} = 119,15^\circ\text{C}$ визначаємо: $Pr_C = 1,02$.

$$Re_1 = \left[89 + 0,024 \cdot 0,86^{0,5} \left(\frac{3,43}{3,02} \right)^{0,25} \cdot (6677 - 2300) \right]^{4/3} = 1220. \quad (5.8)$$

Отримане значення числа Рейнольдса більше за $Re_{кр} = 400$, що не суперечить отриманому вище результату для комплексу Z .

Обчислюємо коефіцієнт тепловіддачі α_1 :

$$Re_1 = \frac{\alpha_1 \cdot \Delta t \cdot l_0}{r_1 \cdot \rho_1 \cdot \nu_1}, \Rightarrow$$

$$\alpha_1 = \frac{Re_1 \cdot r_{пер} \cdot \rho_1 \cdot \nu_1}{\Delta t \cdot L_{II}} = \frac{1220 \cdot 2720,07 \cdot 10^3 \cdot 1,496 \cdot 8,85 \cdot 10^{-6}}{(90 - 65) \cdot 1,3} = 6305,32. \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}. \quad (5.9)$$

5.2 Оцінка впливу модифікації теплоносія на теплообмін і гідродинаміку

У якості об'єкта дослідження було взято водні розчини триетаноламінового ефіру жирних кислот з масовою концентрацією $5 - 20 \text{ мг/л}$, а також водопровідну воду температурою $90, 80, 70, 60^\circ\text{C}$, як основу для порівняння. Дослідження були проведені на спрощеній моделі пакета пластин кожухопластинчастого теплообмінного апарату, пакет пластин омивався теплоносієм модифікованим поверхнево-активними речовинами (ПАР), швидкість -1.3 м/с

Теплопровідність сумішей органічних речовин зазвичай менша розрахованої за правилом адитивності при вираженні складу сумішей у мольних або масових долях. У загальному виді рівняння для бінарних систем має вид

$$\lambda_{Lm} = \lambda_{L1}x_1 + \lambda_{L2}x_2 - Cx_1x_2 \quad (5.10)$$

де де $\lambda_{L1}, \lambda_{L2}$ - теплопровідність компонентів суміші, кал/м·град;

x_1, x_2 – мольні долікомпонентів,

C – константа за правилом Філіппова $C = (\lambda_{L1} - \lambda_{L2})$.

Фрагмент розрахунків представлений у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Результати обчислень теплопровідності сумішей

T, °K	T _m , °K	x ₁	x ₂	C	λ_B , Вт/м · К	λ_p , Вт/м · К
60	333	0,02	0,98	0,4174	0,65	0,63
70	343	0,02	0,98	0,4267	0,662	0,641
80	353	0,02	0,98	0,4324	0,669	0,648
90	363	0,02	0,98	0,4381	0,676	0,655

Інтенсивність теплообміну між рідиною та поверхнею теплообміну характеризує коефіцієнт тепловіддачі [71]. За своїм фізичним характером конвективний теплообмін є складним процесом і залежить від багатьох факторів, які визначають процес тепловіддачі. У загальному випадку коефіцієнт тепловіддачі є функцією фізичних параметрів рідини, характеру течії, швидкості руху, форми, геометричних розмірів тіла та ін. Як вже зазначалось, коефіцієнт тепловіддачі (4.1)

$$\alpha = f(w, \lambda, \mu, \rho, c, X, t_p, t_{cm}, \Delta t, \Phi, l_1, l_2, l_3) \quad (5.11)$$

де X – характер руху рідини;

Φ - форма стінки;

l_1, l_2, l_3 – розміри поверхні, м.

За результатами аналітичних та експериментальних досліджень густини, питомої теплоємності та коефіцієнту теплопровідності отримано значення числа Прандтля водних розчинів модифікатора концентраціями 5- 20 мг/л у робочому діапазоні температур систем теплопостачання 70-90 °С (рисунок.5.4).

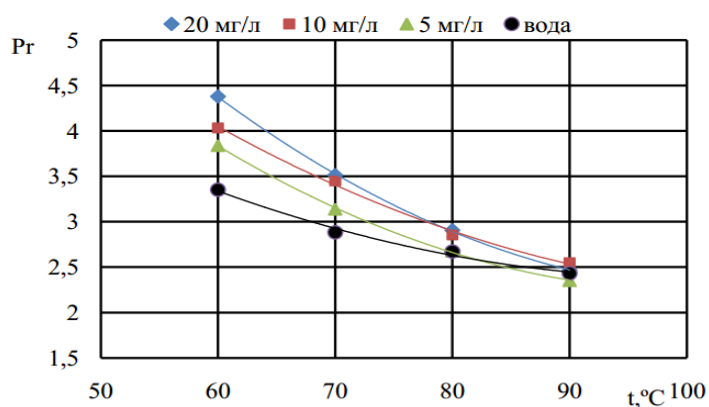


Рисунок 5.4 - Залежність числа Pr модифікованого теплоносія від температури

Числа Pr та Re дозволяють розрахувати Nu. Для теплообміну у кільцевому каналі задовільні результати дає формула

$$Nu = 0,21 Re^{0,8} Pr^{43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (5.12)$$

Результати розрахунку за формулою (5.5) при швидкості 0,8 м/с наведені на рисунку 5.5

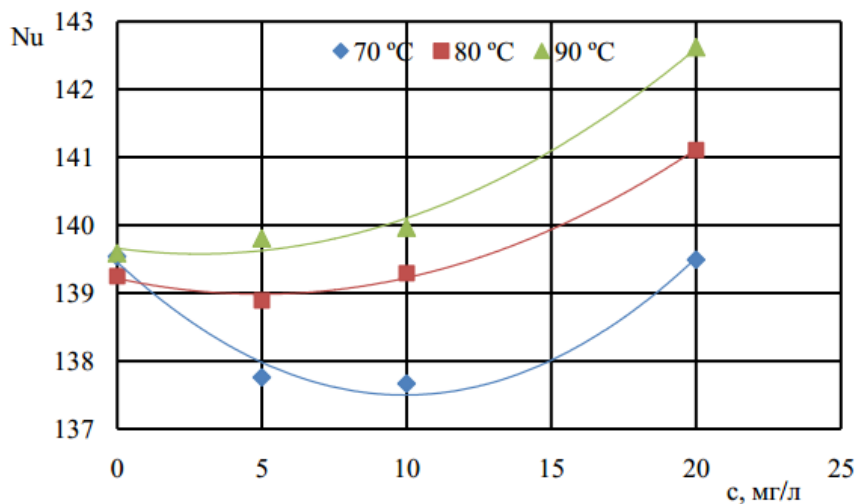


Рисунок 5.5 - Залежність чисел Nu від концентрації модифікатора

Інтенсивність тепловіддачі горизонтальної пластини визначається теплообміном на границі стінка-рідина

$$\alpha = \frac{Q}{F_m (t_{cm} - t_p)} . \quad (5.13)$$

де Q - тепловий потік, Вт;

F_m – площа поверхні нагріву труби-калориметра, м²;

$t_{cm} t_p$ – усереднені температури поверхні нагріву калориметра та рідини- теплоносія, °С.

Числа Нусельта, визначені за критеріальним рівнянням (5.5), дають розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/м²К.

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{d} . \quad (5.14)$$

Результати розрахунку для температур 60 -90 ° наведені на рисунку 5.6

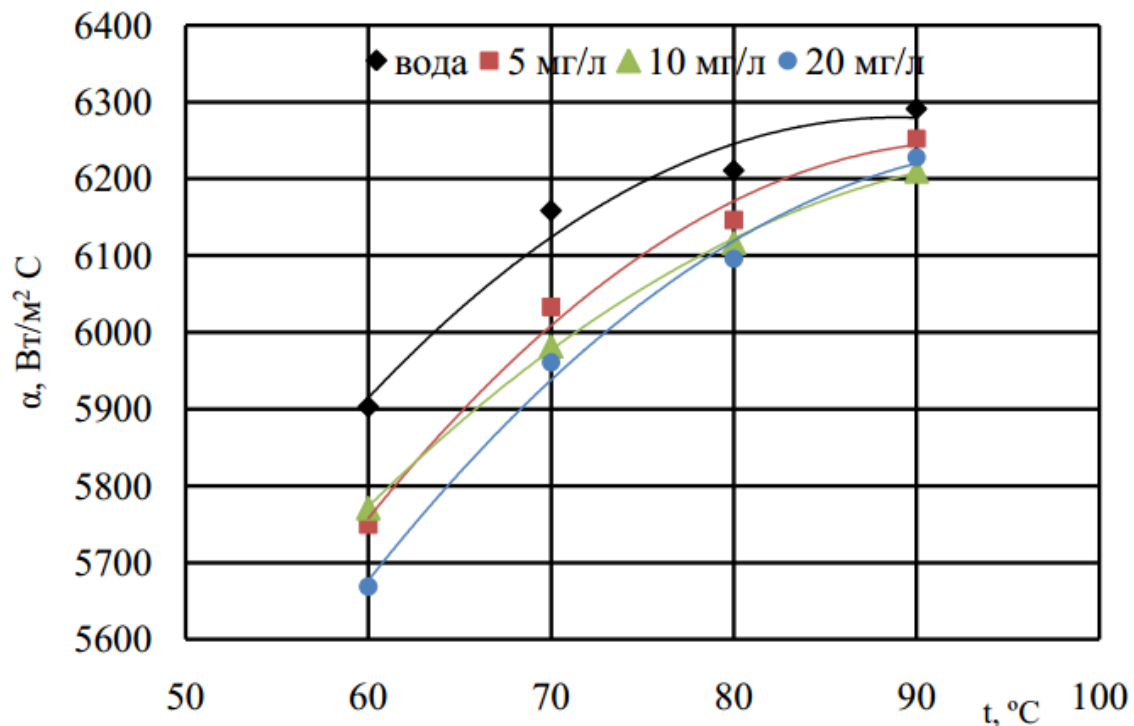


Рисунок 5.6 - Залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури

Чисельне дослідження гідравлічного опору прямої горизонтальної ділянки довжиною 2 м при русі модифікованого теплоносія з масовою концентрацією модифікатора 0,5 -2 мг/л у діапазоні швидкості 0,8-1,3 м/с в ізотермічних умовах за

температури 20°C. Базою для порівняння слугувала водопровідна вода. Величини кінематичної в'язкості рідин отримано експериментально. Коефіцієнти гідравлічного опору у гладких трубах для турбулентного режиму відповідно для води і водних розчинів триетаноламінового ефіру жирних кислот. Гідродинамічний опір визначений за рівнянням Дарсі-Вейсбаха (5.14)

$$\Delta p = \zeta \frac{1}{d} \frac{\rho w^2}{2} \quad (5.15)$$

Формування на поверхні металу упорядкованих шарів поверхнево-активних речовин зменшує шорсткість, коефіцієнт місцевого опору був визначений для першої

$$\delta = 0,3164 / Re^{0,25} \text{ та другої області турбулентної течії } \delta = 0,11 / (\Delta_e / d + 68 / Re)^{0,25}$$

Оскільки у системах теплопостачання теплоносії має мінімальну температуру 60-70 °С, то результати розрахунку Δp на рисунку 5.7 представлені в цьому діапазоні.

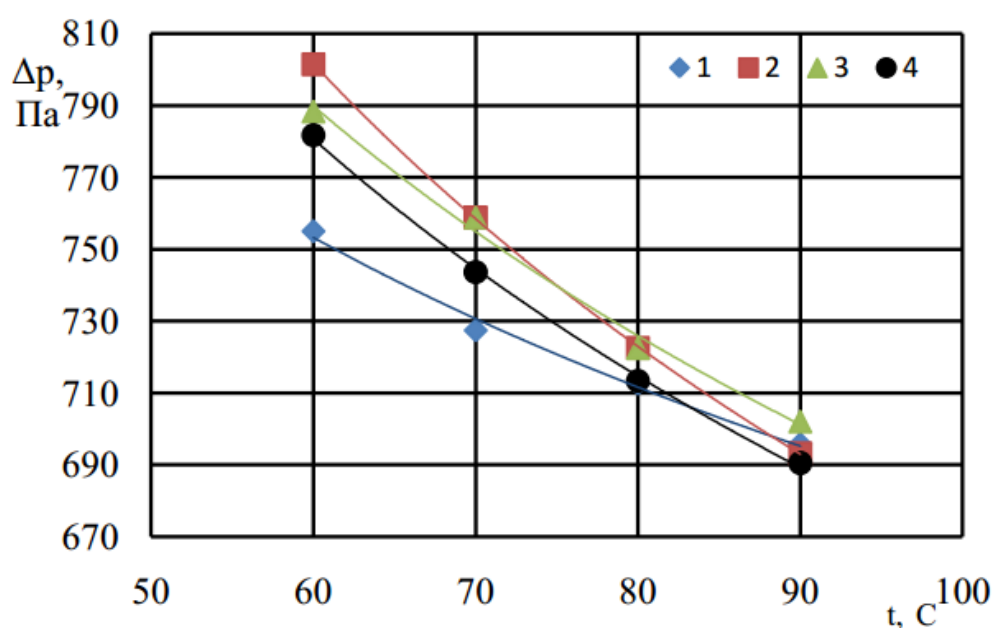


Рисунок 5.7 - Залежність гідродинамічного опору труби від температури теплоносія: 1- водопровідна вода, 2- c=20 мг/л; 3- c=10 мг/л; 4- c=5 мг/л

5.3 Висновки до розділу 5

1 Експериментальні дослідження густини водних розчинів триетаноламінового ефіру жирних кислот масовою концентрацією 5-20 мг/л показали, що для розчинів всіх концентрацій густина змінюється у межах похибки вимірювання.

2 Дослідження кінематичної в'язкості водних розчинів триетаноламінового ефіру жирних кислот масовою концентрацією 5-20 мг/л показали, що для розчинів всіх концентрацій кінематична в'язкість зростає у порівнянні з водою. У робочому діапазоні температур 70-90 °С максимальне зростання встановлено для масової концентрації 20 мг/л на 16% при температурі 70°С та на 2,5-3% при температурі 90°.

3 Питома теплоємність водних розчинів модифікатора відносно води зменшується на 2,8%.

4 Теплопровідність модифікованого теплоносія у діапазоні температур 60-90 °С зменшується відносно води на 3%.

5 Критерій Прандтля модифікованого теплоносія відносно води зменшуються на 16% - при температурі 70 °С і $c=20$ мг/л та на 3% при температурі 90 °С і $c=5$ мг/л.

6 Залежність $Nu=f(c)$ для концентрацій 5-10 мг/л носить лінійний характер. При модифікуванні теплоносія у вказаному діапазоні концентрацій критерій Nu приблизно рівний Nu теплоносію – воді. Внесення модифікатора у кількості 20 мг/л різко знижує Nu .

7 Коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до стінки α при температурі 70 °С лежить у межах 5668 Вт/м² К для $c=20$ мг/л до 5749 Вт/м² К для концентрації $c=5$ мг/л, тоді як для води при цій же температурі 5900 Вт/м² К. З підвищенням температури різниця між коефіцієнтами тепловіддачі для води и модифікованого теплоносія зменшується до: для $c=20$ мг/л 6209-6290 Вт/м² К.

8 Вплив поля природних магнітів у діапазоні напруженості поля $H=0,1-0,21$ Тл та діапазоні температур 30-90 °С на густину, кінематичну в'язкість, поверхневий натяг, теплопровідність знаходиться у межах похибки вимірювання.

6 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

Застосування модифікації теплоносія ПАР дозволяє відмовитись від пом'якшення натрій-катіонуванням та термічної вакуумної деаерації підживлювальної води. Так скорочуються витрати хімічних реагентів, об'єми хлоридовмісних стоків, викиди у навколишнє середовище, зменшується кількість встановленого обладнання. Модифікування змінює шорсткість поверхні обладнання, ламіналізує пограничний шар, зменшуючи гідравлічний опір, підвищує ККД агрегатів і термін експлуатації насосів.

Зміна концентрації до захисту від корозії обладнання дає змогу вивести зі схеми підготовки теплоносія термічний деаератор, або паровий котел, який виробляє теплоту для випаровування води. Це дозволяє виключити використання природного газу на потреби водопідготовки.

Відмиваюча функція ПАР дає змогу не проводити хімічні промивання обладнання із використанням спеціальних кислотно-лужних розчинів і попередити супутні скиди агресивних хімічних речовин у каналізаційну мережу і поверхневі водоймища

У даному розділі проведена оцінка економічного ефекту від впровадження ПАР-режиму підготовки теплоносія у водогрійній котельні теплопродуктивністю 34,3 МВт (29,47 Гкал) з кожухопластинчастими теплообмінниками, трьома газовими котлами ТВГ - 8 та одним КВГ – 4,65. Об'єм системи теплопостачання становить 2230 м³. Розрахункова середньодобова витрата хіміочищеної води для підживлення теплової системи складає 5,573 м³/год

Техніко-економічне порівняння виконано для водогрійної котельні за наступними технологічними схемами підготовки.

Варіант 1 Пом'якшення іонним обміном в натрій-катіонітовому фільтрі та термічна деаерація у вакуумному деаераторі.

Варіант 2 Пом'якшення іонним обміном в натрій-катіонітовому фільтрі та хімічна деаерація деоксидантом.

Варіант 3 Корекційна обробка за допомогою антискаланта та хімічна деаерація деоксидантом.

Варіант 4 Модифікація теплоносія ПАР

Показники якості вихідної води за результатами аналізу наведені у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Якість вихідної води

Найменування показника	Одиниця	Величина
1 Залізо загальне (Fe)	мг/дм ³	0,042
2 Загальна жорсткість	мг-екв/дм ³	6,2
3 Водневий показник рН	-	8,0
4 Завислі речовини	мг/дм ³	0,9
5 Вільна вуглекислота	мг/дм ³	33,0
6 Розчинений кисень	мг/дм ³	3,16

Для оцінки економічного ефекту по кожному варіанту визначили наступні витрати:

1 Кошторисну вартість на монтаж схеми водопідготовки (капітальні вкладення).

2 Річні експлуатаційні витрати.

Для всіх варіантів підготовки теплоносія заробітна плата апаратчиків прийнята рівною.

Для визначення капітальних вкладень установок для пом'якшення води використовувалися договірні ціни, які склали:

1 за варіантом 1 – автоматична установка На-катіонітного пом'якшення води DFU 1252 GL фірми Ecosoft (Україна) – 15,1 тис. грн; термічний вакуумний деаератор ДВ-5 фірми «Саренергомаш» (Російська Федерація) - 36,75 тис. грн.;

2 за варіантом 2 – автоматична установка На-катіонітного пом'якшення води DFU 1252 GL фірми ECOSOFT (Україна) – 15,1 тис. грн; установка для хімічної деаерації води MEDOMAT FP 60 фірми BWT (Австрія) - 40,5 тис. грн., реагент деоксидант PuroTech 30 ТОВ «Технохімреагент» (Україна);

3 за варіантом 3 – дві установки дозування реагентів для корекційної обробки води MEDOMAT FP 60 фірми BWT (Австрія) - 81,0 тис. грн., реагенти деоксидант PuroTech 30, антискалант PuroTech 11 ТОВ «Технохімреагент» (Україна);

4 за варіантом 4 - установка для модифікування теплоносія насосом-дозатором MEDOMAT FP 60 фірми BWT (Австрія) - 40,5 тис. грн., модифікатор ТЕАЕЖК фірми ТОВ «Оріана Галєв» (Україна)

6.1 Розрахунок річних експлуатаційних витрат на обробку живильної води та економічної ефективності застосування результатів досліджень

Вартість ведення водно-хімічного режиму за вибраною схемою оцінюється, тис.грн.

$$C_n = E_i^p \cdot C_i \quad (6.1)$$

де E^p - річна витрата ресурсу, м³/год.

C_i - ціна енергоносія або ресурсу, грн.

Річні експлуатаційні витрати, тис.грн. визначаються за формулою.

$$C_p = C_a + C_{np.} + C_v + C_e + C_{ng} + C_m + C_r + C_{mc} \quad (6.2)$$

де C_a – річні амортизаційні відрахування, тис.грн;

C_{np} – витрати на поточний ремонт, тис.грн;

C_v – витрати на воду, використаної на регенерацію фільтру та компенсацію випару, тис. грн.;

C_e – витрати на електричну енергію, тис.грн;

C_{ng} – витрати на природний газ для вироблення теплоти на підігрів води, тис.грн;

C_m – витрати на модифікатор, тис.грн;

C_r – витрати на робочі реагенти (антискаланти, деоксиданти), тис. грн;

C_{mc} – витрати на технічні солі, тис.грн.

Річні амортизаційні витрати, тис.грн. визначаються за капітальними вкладеннями K і нормами амортизаційних відрахувань.

$$C_a = K \cdot C_a \quad (6.3)$$

де K – капітальні вкладення, тис. грн.;

H_a – норма амортизаційних відрахувань (приймаємо 0,024).

Річні витрати на поточний ремонт, тис.грн. приймаються такими, що дорівнюють 20 % відносно витрат на амортизацію.

$$C_{np} = C_a \cdot 0,2 \quad (6.4)$$

Приведені витрати по варіантах, тис.грн. визначаються за залежністю.

$$П = C_p + E_n \cdot C_i \quad (6.5)$$

де C_p – річні експлуатаційні витрати під час роботи системи водопідготовки, тис грн.

У розрахунку не враховані побічні витрати внаслідок корозії, які залежать від технічного стану системи тепlopостачання і складаються з витрат на ремонт теплогенеруючого обладнання та витрати на заміну трубопроводів, в тому числі труб та монтажні роботи. Річні експлуатаційні витрати зводимо у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 - Річні експлуатаційні витрати по варіантах.

Показники	Тип ВХР, тис. грн./рік			
	класичний	змішаний	корекційний	ПАР
Витрати природного газу	2813,55	917,0	-	-
Витрати на воду	3,03	2,64	-	-
Витрати на електричну енергію	48,66	0,17	0,17	0,09
Витрати на сіль	6,01	6,01	-	-
Витрати на робочі реагенти (антискаланти, деоксиданти)	-	38,51	175,75	-
Витрати на модифікатори	-	-	-	178,4
Витрати на каналізацію	2,51	2,19	-	-
Витрати на хімічні реагенти для аналізів	9,7	9,7	9,7	0,97
Витрати на амортизацію	1,24	1,33	1,94	0,97
Витрати на поточний ремонт	0,25	0,27	0,39	0,19
Витрати на заробітну плату	26,4	26,4	26,4	26,4
Річні витрати експлуатаційні	2911,35	1004,22	214,18	207,02
Приведені витрати	2915,5	1008,65	220,66	210,26
Питомі річні експлуатаційні витрати, тис. грн/м ³	0,1164	0,0401	0,0086	0,0082

6.2 Екологічні аспекти модифікованого теплоносія

Робота систем водопідготовки пов'язана із споживанням енергії та матеріальних ресурсів. Класична схема підготовки води не передбачає видалення всіх агресивних для системи розчинених речовин, а лише доводить їх до рекомендованих значень, то додаткового періодично проводиться хімічне очищення теплообмінних забруднених поверхонь.

Іонообмінні фільтри після вичерпання обмінної ємності катіоніту переходять у стадію регенерації. Для їх відновлення використовується поварена сіль $NaCl$. Регенерація за своїм технологічним регламентом потребує певного об'єму сирової води для промивання. Після проходження реакції заміщення катіонів Na^+ на Ca^{2+} та Mg^{2+} в залежності від вихідної жорсткості води утворюється солі - хлориди цих металів, які надходять до дренажу. Концентрація їх у стічних водах не повинна перевищувати ГДК (240 мг/дм³). Для доведення концентрації до нормованого значення також використовується сира вода.

Важливим енергетичним ресурсом, що використовується, є електрична енергія. При термічній вакуумній деаерації використовується електроенергія для живлення вакуумного насоса ежектора, який необхідний для створення вакууму у деаераційній колонці.

Термічне видалення кисню відбувається при температурі 70 °C у вакуумному та при 104°C у атмосферному деаeratorі, тому воду попередньо нагрівають. Теплопродуктивність теплогенеруючої установки включає навантаження на вироблення теплоти на потреби деаерації, тобто йде на власні потреби. Це знижує ККД котельні бруто, підвищуючи питомі витрати палива. Робота деаeratorів супроводжується появою «випару», через який втрачається частина деаерованої води.

Сучасний процес очищення теплообмінних поверхонь складається з наступних стадій:

- механічне очищення
- промивання водою
- оброблення лугами та кислотами
- очищення органічними розчинниками

Основним витратним ресурсом у цьому ланцюзі є вода, оскільки на її основі готуються кислотні і лужні розчини та нею ж промивається система після кожної стадії.

Таким чином, ключовими ресурсами, що використовуються у водо підготовчих установках котелень за класичною схемою є вода, електрична енергія і органічне паливо. Витратними ресурсами є, крім того, хімічні реагенти і технічна сіль.

Для зменшення витрат палива, електроенергії і інших ресурсів, включно з водою, останнім часом поширюється застосування хімічної деаерації – видалення корозійно-активних газів за допомогою реагентів – деоксидантів (корекційна обробка). До їх складу входять каталізатори, наприклад солі кобальту, що прискорюють реакції. Вони відносяться до важких металів і негативно впливають на навколишнє середовище. Додаючи у воду дисперсанти, попереджують процеси накипоутворення.

Для подачі реагентів встановлюються насоси-дозатори, які споживають порівняно невелику кількість електроенергії. Додаткова витрата води потрібна лише при зливанні надлишків реагентів до дренажу. Хімічні речовини слід дозувати у теплоносії постійно, і їх об'єми значні. Отже, корекційний режим є економніший з точки зору використання енергетичних ресурсів, але більш витратний з точки зору матеріальних.

Застосування модифікації теплоносія у системах теплопостачання кардинально змінює підхід до ВХР. При використанні поверхнево-активних речовин (ПАР) відпадає необхідність змінювати склад теплоносія, видаляючи O_2 , CO_2 , Ca^{2+} та Mg^{2+} . Дослідження показують, що ПАР-режими можуть підвищувати ефективність роботи теплоенергетичних об'єктів. Молекули ПАР формують захисну стійку плівку на поверхнях металу, захищаючи його від корозійних і накипних процесів. Їх присутність у воді сприяє розвитку очисних процесів на поверхнях, що збільшує тепловіддачу у котлах та теплообмінниках, знижуючи питому витрату палива.

Очищення внутрішніх поверхонь труб котлів та поверхонь теплообмінників призводить до зменшення гідравлічного опору, а захисна плівка призводить до зменшення шорсткості труб і до ефективного зменшення гідравлічного опору. Це веде до зниження кількості електроенергії, яка йде на переміщення теплоносія насосами. Витрати електроенергії зменшуються у порівнянні з розрахунковими значеннями через зниження гідравлічного опору системи. Тобто така технологія дозволяє відмовитись від додаткової витрати ключових ресурсів: води, електроенергії та органічного палива. Витрата концентратів ПАР є значно меншою, ніж реагентів дисперсантів та диспергантів, оскільки їх дія є довготривкою і стабільною. ПАР не вступають у реакцію з водою та розчиненим киснем, тому їх не потрібно постійно додавати у воду. Види ПАР, які зараз

застосовуються, не завжди є повністю безпечними для оточуючого середовища і зазвичай їх вартість висока, тому ця технологія не дуже поширена.

У таблиці 6.3. наведена потреба у ресурсах та матеріалах для різних варіантів водно-хімічного режиму водогрійної котельні з підживлення теплоносієм:

- що пройшов водопідготовку двоступеневим натрійкатіонуванням та термічною деаерацією у вакуумному деаераторі (найпоширеніша у практиці схема для теплових мереж з водогрійними котельнями);

- що пройшов водопідготовку двоступеневим натрійкатіонуванням і постійно модифікується деоксидантом (змішаний тип);

- який постійно модифікується дисперсантом і деоксидантом (корекційний режим);

- який модифікований ПАР.

Окремо наведена проблема у видаленні накипу періодичними хімічними промиваннями. Термін між хімічними промиваннями котла - 2 роки, але може бути коротший, в залежності від складу відкладень та експлуатаційних режимів (таблиця 6.3).

Таблиця 6.3 - Потреба у ресурсах та матеріалах для варіантів водно-хімічного режиму

Ресурси і матеріали	Потреба у ресурсах та матеріалах для типу ВХР			
	класична	змішана	корекційний	ПАР
1 Природний газ		-	-	-
2 Вода	+	+	-	-
3 Електроенергія	+	+	+	-
4 Сіль	+	+	-	-
5 Каналізація	+	+	-	-
6 Хімічні речовини	-	+	+	+
7 Хімічна промивка	+	+	-	-

6.3 Висновки за розділом 6

1 Виконано апробацію запропонованих рішень. Впровадження технології модифікації дозволяє знизити витрати природного газу на 13-17% за рахунок інтенсифікації теплообміну на поверхнях обладнання шляхом очищення від відкладень.

2 Застосування технології модифікування теплоносія триетаноламіновими ефірами жирних кислот призводить до економії матеріальних та енергетичних ресурсів і знижує антропогенний тиск на навколишнє середовище.

3 Техніко-економічний аналіз технології водно-хімічного режиму систем теплопостачання з використанням триетаноламінових ефірів жирних кислот показує її економічну ефективність.

ВИСНОВКИ

1 Проаналізовано і вивчено особливості технологій ведення водно-хімічного режиму систем теплопостачання. Визначено необхідність наукового обґрунтування застосування триетаноламінових ефірів жирних кислот.

2 Розглянуто особливості тепломасообмінних та гідравлічних процесів, що відбуваються в кожухопластинчастих теплообмінних апаратах, при зміні його теплофізичних та гідравлічних властивостей.

3 Обґрунтовано підвищення ефективності тепломасообміну між поверхнею нагріву та теплоносієм за рахунок руйнування відкладень, утворення захисної плівки зі збільшенням корозійної стійкості і зменшенням шорсткості поверхні.

5 Досліджено кінетику накопичення і очищення відкладень. Встановлено, що сформований шар-плівка на внутрішніх теплообмінних поверхнях є стійкою, зберігає свої властивості в умовах роботи систем теплопостачання на протязі двох років. Для руйнування відкладень найбільшу ефективність показує водний розчин триетаноламінового ефіру жирних кислот масовою концентрацією 20 мг/л

6 Виконано апробацію запропонованих рішень. Впровадження такої технології дозволяє знизити витрати природного газу на 13-17% за рахунок інтенсифікації теплообміну на поверхнях обладнання шляхом очищення від відкладень. Техніко-економічний аналіз технології водно-хімічного режиму систем теплопостачання показує її високу економічну ефективність.

7 За результатами теоретичних і експериментальних досліджень у діапазоні $t_t=30-90$ °C отримано температурні залежності теплофізичні властивості водних розчинів триетаноламінового ефіру жирних кислот від концентрації. Встановлено, що модифікація теплоносія ТЕАЕЖК помітно змінює коефіцієнт поверхневого натягу та кінематичну в'язкість.

8 Залежність $Nu=f(c)$ для температур 80,90 °C є прямою. Тобто додавання до теплоносія триетаноламінових ефірів жирних кислот у діапазоні робочих температур 80-90 °C систем теплопостачання практично не впливає на теплообмін. Для концентрації модифікатора 5 мг/л Nu близький до води. Зростання теплообміну відбувається у більшій мірі за рахунок очищення поверхонь нагріву від відкладень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Богданов Г.Н. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г. Н., Богданов С. Н., Иванов О. П., Медникова и др. — Под общей ред Г. Н. Даниловой. 1986 . — 303 с.
- 2 Кириллов А.И. Численное моделирование турбулентного течения и теплообмен в трубе с ленточным завихрителем / А.И. Кириллов, В.В Рис, Е.М Смирнов.// Труды И РНКТ.- 136 с.
- 3 Волков Ю.А. Тепло- и массообмен при ламинарной пленочной конденсации пара на вертикальной поверхности из вынужденного потока парогазовой смеси: Дис. канд. техн. наук. — М., 1986. — 164 с.
- 4 Шемагин И.А. Волновые характеристики и теплообмен при пленочной конденсации и пленочном кипении: Дис. докт. техн. наук.— Горький,1980.—259с.
- 5 Ляндзберг А.Р. Вихревые теплообменники и конденсация в закрученном потоке./ А.Р Ляндзберг, А.С. Латкин. - Петропавловск-Камчатский , 2004. — 149с.
- 6 Ляндзберг А.Р. Разработка рациональной технологии комплексного извлечения полезных компонентов при переработке высокотемпературных геотермальных флюидов: Дис. канд. техн. наук. — Чита: ЧитГТУ, 2002. — 178 с.
- 7 Школа В.В. Разработка методики расчета тепло- и массообмена при конденсации пара из вынужденного потока парогазовой смеси на пластине: Дис. ... канд. техн. наук. — М., 1984. — 131 с.
- 8 Архипов Л.И. Экспериментальное исследование тепло- и массообмена при конденсации пара из паровоздушной смеси на вращающемся диске: Дис. ... канд. техн. наук. — М., 1971. — 171 с.
- 9 Чернобыльский И.И Теплоотдача от жидкости, текущей во вращающейся трубе / И.И. Чернобыльский // Труды ИТЭ АН УССР. — Киев. — Вып.1.
- 10 Тобажнянский Л.Л. Теплообмен и гидравлическое сопротивление щелевидных каналов сетчато-поточного типа пластинчатых / Л.Л. Тобажнянский.- 1989. - 16 с.
- 11 Илларионов Ю.Т. Исследование теплоотдачи при конденсации пара в вертикальных трубах: Дис. канд. техн. наук. — Л., 1974. — 160с.
- 12 Кутателадзе С.С. Теплоотдача при пленочной конденсации пара внутри горизонтальной трубы / С.С. Кутателадзе // Вопросы теплопередачи и гидравлики двухфазных сред. — М., Л.: ГЭИ, 1961. — С. 138-156.
- 13 Шекриладзе И.Г. Теплообмен в двухфазных средах с интенсивными процессами парообразования и конденсации: Дис. докт. техн. наук. — Тбилиси, 1981. — 282с.

- 14 Дьяченко Ю.В. Исследование процессов тепломассообмена при конденсации в динамическом двухфазном слое на охлаждающих поверхностях: Дис. канд. техн. наук. – Новосибирск, 1981. – 160с.
- 16 Дойников В.Б. Помощь персоналу по организации водного режима котлов и очистки их от накипи/ В.Б. Дойников. – Мн.: БОИМ, 2007. – 186 с.
- 17 Кастальский А.А. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения / А.А. Кастальский. - М.: Высшая школа, 1984 г.- 368 с.
- 18 Соколов Д.П. Общая гидрология (гидрология суши): Учебник/ Д.П. Соколов. – М.:Гидрометеиздат, 1984. – 422с.
- 19 Карбонаты: минерология и химия / Пер. с англ. Под ред. Р.Дж. Ридера. М. : Мир, 1987. – 497 с.
- 20 Богловская А.В. Закономерности накипеобразования в водогрейном оборудовании систем теплоснабжения (обзор)./ А.В. Богловская // Энергосбережение и водоподготовка. – 2004. – №3. – С. 10–16.
- 21 Рыженков В.А. О проблеме образования термобарьерных отложений и возможности использования минерализированной воды в качестве теплоносителя в системах теплоснабжения / В.А. Рыженков // Вестник МЭИ.- 2008.- №1.- С. 21--28.
- 22 Бударин П. А. Разработка методов диагностирования теплообменного оборудования атомных электростанций на наличие в нем отложений : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / П. А Бударин. – Москва, 2007- 351 с.
- 23 Лукин М.В. Автореферат десерт. к.т.н. «Повышение эффективности эксплуатационных систем теплоснабжения на основе модификации теплообменных поверхностей с использованием поверхностно-активных веществ», М.: МЭИ, 2008 – 93 с.
- 24 Водоподготовка и очистка воды: принципы, технологические приемы, опыт эксплуатации//СОК. – 2004. – №4. – С. 17–30.
- 25 Серебряков В.А. Оценка перерасхода топлива в котлах / В.А. Серебряков // Энергосбережение. – 2005. - №11.- С. 11–15.
- 26 Товажнянский Л. А. К вопросу о загрязнении поверхности теплопередачи пластинчатых теплообменников / Л. А. Товажнянский, П. А. Капустенко. // Известия ВУЗов. Теплоэнергетика. – 1984. – №6. – С. 101–102.
- 27 Анипко О. Б. Надежность пластинчатых теплообменных аппаратов систем отопления и горячего водоснабжения с учетом образования загрязнений на теплопередающей поверхности / О.Б. Анипко, О.П. Арсеньева. //

Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2003. – №4. – С. 9–13.

28 Белоконова А. Ф. Водно-химические режимы тепловых электростанций/ А. Ф. Белоконова. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

29 Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий / В.Н. Юренев. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 527 с.

30 Бузников Е. Ф. Водогрейные котлы и их применение на электростанциях в котельных / Е. Ф. Бузников, В. Н. Сидоров. – Москва: Энергия, 1965. – 240 с.

31 РД 34.37.402-96 Типовая инструкция по эксплуатационным химическим очисткам водогрейных котлов.

32 Балабан-Ирменин, Ю.В. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей / Ю.В Балабан-Ирменин., В.М Липовских., А.М Рубашов. – М. : Энергоатомиздат, 1999. – 248 с.

33 Улиг, Г.Г. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / Г. Г Улиг. , Р. У Ревн. – Л. : Химик, 1989. – 456 с.

34 Ирменин Ю.В. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей / Ю.В. Ирменин. – М.: Энергоиздат, 1999. – 228 с.

35 Акользин А. П. Кислородная коррозия оборудования химических производств / А. П. Акользин, А. П. Жуков. – Москва: Химия, 1985. – 240 с.

36 Наказ Держбуду України №9 від 19.01.1999 р. Правила технічної експлуатації систем теплопостачання комунальної енергетики України.

37 Гурвич С.М. Водоподготовка / С.М. Гурвич. – М.: ГЭИ, 1961. – 238 с.

38 Справочник по водоподготовке котельных установок/ Лифшиц О.В..- М.: «Энергия», 1976. –288 с.

39 Фрейер Р. Приготовление воды для питания паровых и водогрейных котлов высокого и среднего давления / Р. Фрейер. - М.-Л.: ГЭИ.,1960. – 232 с.

40 Фрог Б.Н. Водоподготовка / Б.Н. Фрог. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006.- 656 с.

41 Мещерский Н.А. Водоподготовительный и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления / Н.А. Мещерский. - М.: Энергоатомиздат, 1990.- 254 с

42 Водоподготовка. Справочник/ Беликов С.Е.. М.: Аква-Терм, 2007 р. –76 с.

43 Белан Ф. И. Водоподготовка промышленных котельных / Ф. И. Белан. – Москва: Энергия. – 328 с.

- 44 Давлетшина Г.И. Опыт эксплуатации установок обратного осмоса в системах водоподготовки энергетических и металлургических объектов ОАО «ММК» / Г.И. Давлетшина // Энергосбережение и водоподготовка. - 2006.- №5.- С. 25– 27.
- 45 Первов А.Г. Экономические аспекты применения обратноосмотической и ультрафильтрационной технологии в энергетике / А.Г. Первов // Энергосбережение и водоподготовка. - 2004. -№3.- С. 17–20.
- 46 Андреев Л.Е. Особенности применения мембранных технологий водоподготовки та ТЭС дальневосточного региона / Л.Е. Андреев // Энергосбережениеи водоподготовка.- 2006.- №5.- С. 18–20.
- 47 Иванов М. Ультразвук в водоснабжении и водоподготовке / М. Иванов //Аква-терм. - 2006. - №6.- С. 36–38.
- 48 Серебряков В.А. Неожидаанные результаты использования протинакипного устройства / В.А. Серебряков, М.Ю Стюартов // Энергосбережение и водоподготовка. - 2005. - №10.- С. 12–14.
- 49 Чернюк В.В. Регулювання інтегральних параметрів напірних потоків гідродинамічно активними доданками : автореф. дис. на здобуття наук. ступенядокт. техн. наук / В. В. Чернюк– Київ, 2010 – 54с.
- 50 Хуснуллина Р.Р. Композиционные составы для снижения гидравлического сопротивления в системе трубопроводов сбора и транспорта продуктов нефтяных скважин : дис. канд. техн. наук : 2.00.13 / Р. Р Хуснуллина. – Казань, 2015. – 149 с.
- 51 Перепелица Б.В. Исследование гидродинамики и теплообмена при турбулентном течении воды, содержащей добавки высокомолекулярных полимеров: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук Б. В Перепелица. –Новосибирск, 1971 – 231с.
- 52 Чемпик Э. Комплексное исследование влияния ПАВ на энергетическиеи структурные характеристики влажнопаровых потоков турбин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Э.Чемпик . – Москва, 1980-564с.
- 53 Чашин И.П. Исследование влияние органических добавок на гидравлическое сопротивление и теплообмен в потоке / И.П. Чашин // Инженерно-физический журнал. 1973 . Т. 25., №6. – С. 1101-1106.
- 54 Повх И. Л. Снижение гидродинамического сопротивления добавками /И. Л. Повх, А. Б. Ступин. – Киев. Донецк: Высшая школа, 1977. – 151 с.

- 55 Хабакашева Е.М. Об особенностях пристенной турбулентности в потоках воды с высокомолекулярными добавками / Е. М. Хабакашева, Б. В. Перепелица. // Инженерно-физический журнал. – 1970. – №6.
- 56 Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление / С. С. Кутателадзе. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 397 с.
- 57 Рыженков А. В. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на гидравлическое сопротивление трубопроводов систем теплоснабжения и разработка способа снижения энергозатрат при транспортировке теплоносителя : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / А. В Рыженков. – Москва, 2008 – 127с.
- 58 Салтанов Г.А. Гидродинамика и тепломассообмен в присутствии ПАВ / Г.А. Салтанов. - М.: Энергоатомиздат, 1988. -184с.
- 59 Куршаков А.В. О повышении эффективности эксплуатации городских систем теплоснабжения на основе ПАВ-технологий / А.В. Куршаков // Новости теплоснабжения. - 2007.- №12.- С. 45--47.
- 60 Рыженков В.А. О проблеме образования термобарьерных отложений и возможности использования минерализированной воды в качестве теплоносителя в системах теплоснабжения / В.А. Рыженков // Вестник МЭИ.- 2008.- №1.- С. 21--28.
- 61 Анахов И.П. Повышение эффективности эксплуатации систем оборотного водоснабжения ТЭС на основе удаления и предотвращения образования термобарьерных отложения на трубных поверхностях конденсаторов. Дис. к.т.н. М.:МЭИ., 2008 г.-453с.
- 62 Пирогов Г.В. Исследование комбинированных химических и акустических методов ограничения накипеобразования в теплообменном оборудовании ТЭС и котельных : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Г. В.Пирогов. – Москва, 2008 –245с.
- 63 А. К. Янатьева. О влиянии ПАВ на процесс образования накипи / А.К. Янатьева, В.Г. Орлова К. А. Клеваичук // Журнал прикладной химии. – 1976. – №9. С. 1911–1914.
- 64 Санітарно-гігієнічний висновок Державної санітарно-гігієнічної служби Російської Федерації № 77.01.12.238.П.10946.05.4 від 19.05.2004 р.
- 65 Кукушкин А.Н. Результаты введения ОДА-гидразинного режима 2-го контура АЭС с ВВЭР-440 / А.Н. Кукушкин // Энергосбережение и водоподготовка. -2007.– №3. – С. 2–5.

66 Жуков В. А. Научные основы повышения эксплуатационных показателей высокооборотных судовых ДВС совершенствованием их охлаждения : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук / В. А.Жуков. – Санкт- Петербург, 2012 -17с.

67 Безюков О. К. Экспериментальное исследование теплоотдачи в жидкости, содержащей добавки высокополимеров и ПАВ / О. К. Безюков, В.А. Жуков, В.А. Ларин. // Инженерно-физический журнал. – 1993. – №1. – С. 34–38.

68 Ступин А.Б. Применение гидродинамически активных добавок полимеров и ПАВ в энергосберегающих технологиях / А.Б. Ступин, П. В. Асланов.// Прикладная гидромеханика. – 2001. – №1. – С. 74–81.

69 Телин П.В. Оценка влияния накипеобразования на тепловое состояние роликов металлургических машин / П.В. Телин // Материалы IV международной технической конференции. Вологда: ВоГТУ – 2004. – С.223 – 226.

70 Исаченко В.В. Теплопередача/ В.В. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел . – М. : Энергоатомиздат, – 1981. – 416 с.

71 Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю.Г. Фролов. - М.: Химия, 1988.-464 с.

Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан теплоенергетичного
факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського

Евген ПИСЬМЕННИЙ

« 20 » квітня 2021 р

ЗАТВЕРДЖУЮ



Р

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на науково-дослідну роботу

«Підвищення ККД кожухопластинчастих теплообмінників та зниження їх
гідравлічного опору за допомогою поверхнево-активних речовин в НГДУ
«Охтирканавтогаз» в м. Ромни Сумської області»

1. Термін виконання роботи

Початок – 15.10. 2021 р.

Закінчення – 20.04. 2021 р.

2. Обґрунтування для виконання роботи

В магістерській дисертації виконати роботи по зниженню гідравлічного опору
трубопроводів на 25-30% і підвищенню внутрішнього ККД кожухопластинчастих
теплообмінників до 4% за рахунок кондиціонування внутрішніх поверхонь ПАР

3. Мета роботи

Проаналізувати основні способи очищення теплообмінних поверхонь
кожухопластинчастих теплообмінників та вибрати найефективніший. На базі програмного
забезпечення Solid Works зробити оцінку впливу модифікованого теплоносія на
теплообмін і гідродинаміку кожухопластинчастого теплообмінника

4. Зміст основних етапів виконання роботи

Загальні дані про кожухопластинчасті теплообмінники типу PSHE
Особливості пластин та гофрування кожухопластинчастих теплообмінників
Стан питання зниження ефективності в наслідок накипоутворення і корозії.
Порівняння коефіцієнтів теплопередачі до та після застосування ПАР та висновки

5. Матеріали, що подаються після закінчення роботи

5.1. Магістерська дисертація.

5.2. Довідка про впровадження результатів.

6. Порядок розгляду і приймання роботи

Результати роботи розглядаються на засіданні ЕК із захисту атестаційних робіт
освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика», спеціалізацією
«Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження».

Керівник роботи

к.т.н., доц ТЕФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Барабаш ПЕТРО

« ____ » _____ 2021 р

Виконавець

Студент гр.ТП-51 МН
Богдан ОЛІЙНИК
« 20 » квітня 2021 р.

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів магістерської дисертації студента другого (магістерського) рівня вищої освіти

ТЕФ, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Олійника Богдана Валерійовича

Результати магістерської дисертації магістранта КПІ ім. Ігоря Сікорського Олійника Б.В. за темою «Підвищення ККД кожухопластинчастих теплообмінників та зниження їх гідравлічного опору за допомогою поверхнево-активних речовин» впроваджені в НГДУ «Охтирканефтегаз» в м. Ромни, Сумської області у частині віртуального моделюванні кужухопластинчастого теплообмінника; та дослідження його теплофізичних та гідравлічних характеристик за допомогою програмного забезпечення Solid Works.

Умови технічного завдання виконано у повному обсязі.

ДОДАТОК В

Форма № 3.3

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Олійник Богдан Валерійович

Прізвище, ім'я, по-батькові

№ з/п	Найменування праць	Рукописні або друковані	Назва видавництва , журналу (номер ,рік) або номер авторського свідоцтва, дипломного на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвище співавтора праці
1	2	3	4	5	6
1	Про особливості конструкцій кожухопластинчастих теплообмінників і сфери їх застосування	Друк	І науково-технічна конференція магістрантів ІЕЕ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів). Зб. наукових праць ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського – Київ: ІЕЕ, 2018. – 380с	7 стор.	Гавриш А. С Руденко С В.

2	Особливості конструкції і галузей застосування кожухопластинчастих теплообмінних апаратів(Диплом III-ступеня в номінації «Енергозбереження та енергоменеджмент»)	На правах рукопису	XVII всеукраїнський конкурс «Молодь – енергетиці України – 2018: відкритий конкурс молодих енергетиків та вчених»	30 стор.	Гавриш А.С Руденко С В
3	Кожухопластинчасті теплообмінні апарати. Частина 1. Конструкція та принцип дії	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 24–27 квітня 2018 р. У 2 т. – К. : КПІ 950н. Ігоря Сікорського, 2018. – ISBN 978-966-622-887-4 (Т.1). – С 222	1 стор.	Гавриш А. С Руденко С В

4	Кожухопластинчасті теплообмінні апарати. Частина 2. Галузі застосування	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 24–27 квітня 2018 р. У 2 т. – К. : КПІ Ігоря Сікорського, 2018. – ISBN 978-966-622-887-4 (Т.1). – С 223	1 стор.	Руденко С В Гавриш А С
---	---	------	---	---------	-------------------------------------

5	Правила безпеки під час експлуатації теплових пунктів на базі кожухопластинчастих теплообмінних апаратів	Друк	Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки: Збірник матеріалів Двадцять першої Всеукраїнської науково-методичної конференції (з участю студентів), м. Київ, 18-20 листопада 2019 р.	5 стор.	Гавриш А С
6	Загальні правила безпеки під час обслуговування тепломеханічного обладнання електростанцій і теплових мереж	друк	Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки: Збірник матеріалів Двадцятій Всеукраїнської науково-методичної конференції (з участю студентів), м. Київ, 15-17 травня 2019 р. – К.: КПІ Ігоря Сікорського, 2019. – ISBN 978-966-684-006-6 –С 70-74	5 стор.	Гавриш А С

7	Особливості будови і функціонування кожухопластинчастих теплообмінних апаратів	На правах рукопису	XII науково технічна конференція «Енергетика. Екологія.Людина.» Зб. наукових праць ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського – Київ:	5 стор.	Гавриш А. С.
8	Особливості теплообміну сучасних теплоносіїв в кожухопластинчастих теплообмінниках	На правах рукопису	XVIII-й міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики»	2стор	Гавриш А.С.
9	Результати досліджень теплофізичних та гідравлічних характеристик кожухопластинчастих теплообмінних апаратів, при використанні поверхнево активних речовин	На правах рукопису	XIX-й міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених та студентів»Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики	2 стор	Барабаш П.О.

Автор

Богдан ОЛІЙНИК.

ДОДАТОК Г

Перевірка магістерської дисертації на академічний плагіат



Ім'я користувача:
Боженко Михайло Федорович

ID перевірки:
1007852209

Дата перевірки:
13.05.2021 14:20:18 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
13.05.2021 14:25:53 EEST

ID користувача:
100005082

Назва документа: Olijnik_magistr

Кількість сторінок: 76 Кількість слів: 16925 Кількість символів: 126452 Розмір файлу: 2.63 MB ID файлу: 1007947401

16.1% Схожість

Найбільша схожість: 5.58% з Інтернет-джерелом (<http://en.lee.kpi.ua/files/2018/dopovid2018.pdf>)

15.4% Джерела з Інтернету 15 Сторінка 78

1.76% Джерела з Бібліотеки 38 Сторінка 78

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0.28% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 10 слів та 0%)

0.19% Вилучення з Інтернету 21 Сторінка 79

0.09% Вилученого тексту з Бібліотеки 93 Сторінка 79

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 126